

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЫЦИНА

Г. А. Орлов

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по программе бакалавриата  
по направлению подготовки 150400 «Металлургия»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2013

УДК 621.7(075.8)  
ББК 34.1я73-1  
О-664

Научный редактор  
доктор технических наук, профессор В. П. Швейкин

Рецензенты  
Б. М. Готлиб, доктор технических наук, профессор  
(Уральский государственный университет путей сообщения)  
С. В. Смирнов, доктор технических наук  
(Институт машиноведения УрО РАН)

**Орлов, Г. А.**

О-664 Технологические процессы обработки металлов давлением : [учеб. пособие] / Г. А. Орлов ; [науч. ред. В. П. Швейкин] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федерал. ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 198 с. : ил.

ISBN 978-5-7996-0887-3

Приведены общие сведения об особенностях технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД). Кратко изложены основы теории ОМД. Значительное внимание уделено видам ОМД, схемам выполнения процессов, технологическим режимам и оборудованию. Рассмотрены этапы разработки технологии производства изделий методами прокатки, волочения,ковки,штамповки,прессования. Показаны перспективы применения непрерывнолитой заготовки и совмещенных процессов ОМД с литьем и термической обработкой.

Предназначено для студентов, обучающихся по программе бакалавриата, может быть полезно также магистрам и аспирантам.

УДК 621.7(075.8)  
ББК 34.1я73-1

ISBN 978-5-7996-0887-3

© Уральский федеральный университет, 2013  
© Орлов Г. А., 2013

# ВВЕДЕНИЕ

Обработка металлов давлением (ОМД) — один из основных способов получения изделий, сочетающий высокую производительность, универсальность, малоотходность, возможность проработки структуры металла, получения высоких эксплуатационных свойств изделий. Фактически ни одна отрасль промышленности не обходится без использования ОМД в технологическом цикле. Прогресс в таких отраслях, как самолето- и ракетостроение, медицина, атомная энергетика, нефте- и газодобыча, судостроение, машиностроение, был бы невозможен без современных технологий изготовления деталей и узлов машин и аппаратов с помощью ОМД. Благодаря фундаментальной научной базе (механика сплошных сред, теория пластичности, механика и физика твердого тела) обработка металлов давлением развивается как прикладная наука, во многом определяющая развитие промышленности.

Современный специалист должен быть хорошо знаком с основами, особенностями и видами технологии процессов ОМД для получения различных изделий, современными тенденциями их развития во взаимосвязи с другими металлургическими процессами.

Изучению процессов ОМД предшествует освоение дисциплин по технологическим процессам производства черных и цветных металлов из руд, изучение их свойств в жидком и твердом состояниях, а также основ технической механики и сопротивления материалов.

Лишь после изучения перечисленных курсов можно приступать к освоению инженерных дисциплин, рассматривающих оборудование металлургических цехов, проектирование цехов и технологий металлургических заводов и мини-производств, в том числе связанных с ОМД.

Учебное пособие соответствует программам дисциплин «Основы технологических процессов ОМД» и «Обработка металлов давлением».

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

## 1.1. Основные термины и определения

**Технология** — это совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, применяемых в процессе производства, для получения готовой продукции; наука о способах воздействия на сырье, материалы или полуфабрикаты соответствующими орудиями производства<sup>1</sup>.

Технология разрабатывается обычно по отраслям промышленности (машиностроение, строительство, приборостроение и др.) и обязательно включает технологию получения и обработки металлов, в том числе и обработку металлов давлением (ОМД). Таким образом, технология ОМД — неотъемлемая часть технологии любого промышленного производства, имеющего дело с металлами и металлическими сплавами.

Можно выделить следующие основные принципы разработки технологии:

- надежность, повторяемость, стабильность получаемых результатов;
- экономичность, малозатратность, рентабельность;
- современность, наукоемкость, прогрессивность;
- экологичность, регенеративность отходов, соответствие санитарным нормам и нормативам по защите окружающей среды;
- возможность автоматизации производства, высвобождение ручного труда.

---

<sup>1</sup> См.: Политехнический словарь / гл. ред. акад. А. Ю. Ишлинский. 2-е изд. М. : Сов. энцикл., 1980. 656 с.



ГОСТ 14.004—83 определяет типы и виды промышленного производства.

**Тип производства** — классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска продукции. Различают следующие типы производства: единичное, серийное и массовое.

**Единичное производство** характеризуется малым объемом выпуска одинаковых изделий, повторное изготовление и ремонт которых, как правило, не предусматривается.

**Серийное производство** характеризуется изготовлением или ремонтом изделий периодически повторяющимися партиями.

**Массовое производство** отличается большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых или ремонтируемых продолжительное время, в течение которого на большинстве рабочих мест выполняется одна рабочая операция.

**Вид производства** — классификационная категория производства, выделяемая по признаку применяемого метода изготовления изделия (например, литейное, сварочное, кузнечное и др.).

Также по отношению к товарной продукции производство делится на основное (для выпуска товаров) и вспомогательное (для производства средств, необходимых для обеспечения функционирования основного производства). В частности, к вспомогательному относится инструментальное производство для изготовления технологической оснастки.

По степени завершенности технологических процессов производство разделяют на опытное (изготовление образцов, партий или серий изделий для исследовательских работ или разработки конструкторской и технологической документации для установившегося производства) и установившееся (функционирующее по окончательно отработанной конструкторской и технологической документации) производство.

Технология реализуется на производстве в виде технологического процесса, который выполняется в соответствии с технологической документацией. **Единая система техноло-**

гической документации (ЕСТД) стандартизована соответствующими ГОСТами.

Рассмотрим термины и определения ЕСТД по ГОСТу 3.1109—82.

**Производственный процесс** — совокупность всех действий людей и орудий труда, необходимых на данном предприятии для изготовления и ремонта продукции.

**Технологический процесс** — часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда.

**Технологический маршрут** — последовательность прохождения заготовки по цехам и производственным участкам предприятия при выполнении технологического процесса.

**Под предметом труда** понимаются обрабатываемые заготовки и изделия. Технологический процесс может быть отнесен к изделию, его составной части или к методам обработки, формообразования и сборки.

ГОСТ 3.1109—82 определяет следующие предметы труда:

— материал — исходный предмет труда, потребляемый для изготовления изделия;

— основной материал — материал исходной заготовки;

— вспомогательный материал — материал, расходуемый при выполнении технологического процесса дополнительно к основному материалу;

— полуфабрикат — предмет труда, подлежащий дальнейшей обработке на предприятии-потребителе;

— заготовка — предмет труда, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхности и (или) материала изготавливается деталь;

— исходная заготовка — заготовка перед первой технологической операцией;

— изделие — единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках (экземплярах) (ГОСТ 15895—77);

— комплектующее изделие — изделие предприятия-поставщика, применяемое как составная часть изделия, выпускаемого предприятием-изготовителем;

— типовое изделие — принадлежащее группе изделий близкой конструкции, обладающее наибольшим количеством конструктивных и технологических признаков этой группы;

— сборочный комплект — группа составных частей изделия, которые необходимо подать на рабочее место для сборки изделия или его составной части.

ГОСТ 3.1109—82 определяет также виды (типы) технологических процессов и операций.

Единичный технологический процесс обеспечивает изготовление или ремонт изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

Типовой технологический процесс применяется для изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповой технологический процесс соответствует изготовлению группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

Технологическая операция — структурная единица технологического процесса, законченная его часть, выполняемая на одном рабочем месте.

Типовая технологическая операция характеризуется единством содержания и последовательности технологических переходов для группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками.

Групповая технологическая операция применяется для совместного изготовления группы изделий с различными конструктивными, но общими технологическими признаками.

ГОСТ 3.1109—82 определяет также элементы технологических операций:

— переход — это законченная часть технологической операции, выполняемая одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке;

— позиция — фиксированное положение обрабатываемой заготовки относительно инструмента или неподвижной части оборудования при выполнении определенной части операции;

— закрепление — это приложение сил к предмету труда для обеспечения постоянства его положения;

— рабочий ход — законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, качества поверхности и свойств заготовки;

— и т. д.

Стандартизованы следующие х а р а к т е р и с т и к и технологического процесса (операции):

— цикл — интервал календарного времени от начала и до конца периодически повторяющейся технологической операции независимо от числа одновременно изготавливаемых изделий;

— такт выпуска — интервал времени, через который периодически производится выпуск изделий или заготовок определенных наименований и типоразмеров;

— технологический режим — совокупность значений параметров технологического процесса в определенном интервале времени;

— подготовительно-заключительное время — интервал времени, затрачиваемый на подготовку к выполнению операции и приведения в порядок рабочего места после выполнения операции;

— штучное время — интервал времени, равный отношению цикла технологической операции к числу одновременно изготавливаемых изделий;

— основное время — часть штучного времени, затрачиваемая на изменение состояния предмета труда;

— вспомогательное время — часть штучного времени, необходимого для обеспечения изменения состояния предмета труда;

— оперативное время — сумма основного и вспомогательного времени и др.

— и т. д.

Т е х н о л о г и ч е с к а я н о р м а — регламентированное значение показателя технологического процесса.

**Технологическое нормирование** — установление технически обоснованных норм расхода производственных ресурсов.

**Норма времени** — регламентированное время выполнения некоторого объема работ в определенных производственных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации.

**Единица нормирования** — количество произведенных объектов или число работающих, на которое устанавливается техническая норма.

**Норма выработки** — регламентированный объем работы, которая должна быть выполнена в единицу времени в определенных условиях одним или несколькими исполнителями соответствующей квалификации.

Технологический процесс выполняется следующими средствами технологического оснащения: технологическим оборудованием, оснасткой, приспособлениями, инструментом.

**Технологическая оснастка** — средства технологического оснащения, дополняющие технологическое оборудование для выполнения определенной части технологического процесса.

**Приспособления** — технологическая оснастка, предназначенная для установки или направления предмета труда или инструмента при выполнении технологической операции.

**Инструмент** — технологическая оснастка, предназначенная для воздействия на предмет труда с целью изменения его состояния.

Для выполнения технологического процесса разрабатывается комплект документов. Выпуск качественного изделия возможен только при соблюдении технологической дисциплины, т. е. точного соответствия технологического процесса требованиям технологической и конструкторской документации.

**Технологический документ** — графический или текстовый документ, который отдельно или в совокупности

с другими документами определяет технологический процесс или технологическую операцию.

Виды документов и стадии их разработки установлены ГОСТом 3.1102—81.

Стадии разработки технологической документации, применяемой для технологических процессов изготовления изделий, определяются в зависимости от стадий разработки используемой конструкторской документации.

Стадии разработки рабочей технологической документации устанавливаются разработчиком документации и включают (по ГОСТу 3.1102—81):

1. Предварительный проект для изготовления и испытания макета изделия и (или) его составных частей на основании конструкторской документации, выполненной на стадиях эскизного и технического проектов.

2. Разработка документации:

а) опытного образца (партии) на основании соответствующей конструкторской документации предусматривает корректировку документации по результатам изготовления и предварительных и приемочных испытаний;

б) серийного (массового) производства на основании соответствующей конструкторской документации.

В зависимости от назначения технологические документы подразделяются на основные и вспомогательные. К основным относятся документы, содержащие сводную информацию, необходимую для решения одной или комплекса инженерно-технических, планово-экономических и организационных задач, а также полностью и однозначно определяющие технологический процесс (операцию) изготовления или ремонта изделия (составных частей изделия). К вспомогательным относят документы, применяемые при разработке, внедрении и функционировании технологических процессов и операций (например, карту заказа на проектирование технологической оснастки, акт внедрения технологического процесса и др.).

**Технологическая инструкция** предназначена для описания технологических процессов, методов и приемов, повторяющихся при изготовлении изделий, правил эксплуатации средств технологического оснащения.

**Маршрутная карта** используется для маршрутного и маршрутно-операционного описания технологического процесса или указания полного состава технологических операций при операционном описании изготовления или ремонта изделия, включая контроль и перемещение по всем операциям различных технологических методов в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, технологической оснастке, материальных нормативах и трудовых затратах.

**Карта технологического процесса** предназначена для операционного описания технологического процесса в технологической последовательности по всем операциям одного вида обработки, с указанием переходов, технологических режимов и данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых затратах.

Допускается взамен маршрутной карты использовать соответствующую карту технологического процесса.

**Операционная карта** используется для описания технологической операции с указанием последовательного выполнения переходов, данных о средствах технологического оснащения, режимах и трудовых затратах.

**Ведомости** служат для указания перечней различных категорий:

- технологических маршрутов;
- оснастки;
- оборудования;
- материалов;
- удельных норм расхода материалов;
- сборки изделий (указывается состав деталей и сборочных единиц);
- операций;

— дефектации (указываются изделия или их составные части, подлежащие ремонту, с определением вида ремонта и дефектов);

— технологических документов (указывается полный состав документов, необходимых для изготовления или ремонта изделий и передачи их на другое предприятие).

Цель технологических разработок — выпуск продукции требуемого качества. В соответствии с ГОСТом 15.001—88 продукция, подлежащая разработке и постановке на производство, должна удовлетворять требованиям заказчика и обеспечивать возможность эффективного ее применения потребителем и (или) возможность экспорта. Требования к техническому уровню продукции устанавливаются с учетом требований, предусмотренных в законодательных и иных нормативных актах.

Разработка продукции осуществляется по договору с заказчиком или по инициативе разработчика, а также может выполняться по конкурсу в соответствии с положением о нем. Результаты разработки как вид научно-технической продукции передаются заказчику или, по его указанию, изготовителю для производства промышленной продукции. Функции заказчика может выполнять государственная, кооперативная или общественная организация (предприятие).

Разработчик на основе исходных требований заказчика, изучения спроса, условий применения, тенденций развития и имеющегося научно-технического задела проводит необходимые научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы, включая патентные исследования, использует функционально-стоимостный анализ, моделирование, художественное конструирование и другие прогрессивные методы создания продукции. При этом следует руководствоваться нормативно-техническими и другими документами, в которых установлены значения показателей, определяющих технический уровень продукции, требования сопротивляемости внешним воздействиям, заменяемости и совместимости составных частей и продукции в целом, безопасности, охраны здоровья и природы.



Разработка и постановка продукции на производство в общем случае предусматривает:

- 1) разработку технического задания;
- 2) разработку технической и нормативно-технической документации;
- 3) изготовление и испытание образцов продукции;
- 4) приемку результатов разработки;
- 5) подготовку и освоение производства.

Техническое задание является основным исходным документом для разработки продукции. Оно должно содержать технико-экономические требования к продукции, определяющие ее потребительские свойства и эффективность применения, перечень документов, требующих совместного рассмотрения, порядок сдачи и приемки результатов разработки. При необходимости техническое задание может содержать также требования к подготовке и освоению производства.

Конкретное содержание технического задания, порядок его разработки и утверждения определяют заказчик и разработчик, а при инициативной разработке — разработчик. Как правило, техническое задание включает следующие разделы:

- 1) наименование и область применения,
- 2) основания для разработки,
- 3) цель и назначение разработки,
- 4) источники разработки,
- 5) технические требования к продукции,
- 6) экономические показатели,
- 7) стадии и этапы разработки,
- 8) порядок контроля выполнения работ и приемки,
- 9) приложения.

Разработку конструкторской (КД) и технологической (ТД) документации, а также, при необходимости, программной документации (ПД) на изделия проводят по правилам, установленным соответственно стандартами ЕСКД, ЕСТД, ЕСПД.

В процессе разработки документации выбор и проверка новых технических решений, обеспечивающих достижение основных

потребительских свойств продукции, должны осуществляться при лабораторных, стендовых и других исследовательских испытаниях моделей, макетов, натуральных составных частей изделий и экспериментальных образцов продукции в целом в условиях, имитирующих, как правило, реальные условия эксплуатации (потребления).

Для подтверждения соответствия разработанной технической документации исходным требованиям и выбора лучшего образца (при наличии вариантов) изготавливают опытные образцы (опытные партии). Опытные образцы допускается не изготавливать для мелкосерийной продукции, при модернизации или модифицировании серийной (массовой) продукции, а также при получении конечных изделий агрегатированием из отработанных деталей, узлов, блоков и модулей при условии, что результатов предыдущих испытаний и эксплуатации достаточно для оценки свойств продукции. Необходимость изготовления опытных образцов (партий) и их количество (объем) указывают в техническом задании.

Опытные образцы (опытную партию) или единичную продукцию (головной образец) подвергают приемочным испытаниям в соответствии с действующими стандартами или типовыми программами и методиками испытаний, относящимися к данному виду (группе) продукции. При их отсутствии или недостаточной полноте испытания проводят по программе и методике, подготовленным разработчиком и согласованным с заказчиком или одобренным приемочной комиссией. При согласии заказчика на приемочные испытания вместо опытных могут быть представлены экспериментальные образцы. При постановке на производство типоразмерного ряда продукции приемочным испытаниям подвергают образцы — типовые представители ряда, которые выбирает разработчик по согласованию с заказчиком (основным потребителем).

Приемочные испытания проводит разработчик совместно с заказчиком или приемочная комиссия. По требованию заказчика или по решению разработчика приемочные испытания могут быть поручены специализированной испытательной организации (испытательному центру) или изготовителю.

Разработчик на основе требований технического задания и стандартов, касающихся данного вида продукции, с учетом результатов испытаний в установленных случаях разрабатывает проект нормативно-технического документа на конкретную продукцию (технические условия или стандарт) или отражает все требования к качеству продукции в технической документации.

Оценку выполненной разработки и принятие решения о производстве и (или) применении продукции (для единичной продукции) проводит приемочная комиссия, в состав которой входят представители заказчика (основного потребителя), разработчика, изготовителя и Государственной приемки (при ее наличии на предприятии-разработчике). Для конечной продукции, предназначенной для внутреннего и внешнего рынка, в состав комиссии включают представителя организации, ответственной за экспорт. При необходимости к работе комиссии могут быть привлечены эксперты сторонних организаций, а также органы, осуществляющие надзор за безопасностью, охраной здоровья и природы. Председателем комиссии назначают заказчика, а при его отсутствии — основного потребителя. Состав комиссии формирует и утверждает разработчик.

На приемочную комиссию разработчик представляет техническое задание, проект технических условий или стандарта технических условий (если их разработка предусмотрена), конструкторские и (или) технологические документы, требующие совместного рассмотрения, результаты испытаний и другие материалы, подтверждающие соответствие разработанной продукции этим документам и удостоверяющие ее технический уровень и конкурентоспособность. Приемочной комиссии, как правило, представляют также опытные или экспериментальные образцы продукции, а если их изготовление не было предусмотрено, — головной образец или единичную продукцию.

По результатам рассмотрения представленных материалов комиссия составляет акт, в котором указывает:

- 1) соответствие разработанной (изготовленной) продукции заданным требованиям и рекомендации по производству (сдаче потребителю);

- 2) результаты оценки технического уровня продукции;
- 3) рекомендации об изготовлении установочной серии (для серийной и массовой продукции) и ее объем;
- 4) замечания и предложения по доработке продукции (при необходимости).

Акт приемочной комиссии утверждает ее председатель. Утверждение акта приемочной комиссии означает окончание разработки, прекращение действия технического задания (если оно не распространяется на дальнейшие работы), согласование представленных нормативно-технических и эксплуатационных документов, а также разрешение на производство или использование продукции.

При отрицательной оценке результатов разработки в целом в акте указывают направления дальнейших работ и условия повторного представления результатов или нецелесообразность продолжения работ.

Подготовку производства, как правило, начинают параллельно с разработкой технической документации и изготовлением при необходимости отдельных составных частей изделия или изделия в целом.

Освоение производства, если оно не было выполнено ранее, проводят в процессе изготовления установочной серии первой промышленной партии). При этом выполняют мероприятия по отработке технологии и подготовке персонала к выпуску продукции со стабильными свойствами и в заданном объеме.

Для подтверждения готовности производства к серийному (массовому) выпуску продукции изготовитель с участием Государственной приемки (при ее наличии на предприятии-изготовителе) проверяет полноту технологического процесса, качество и стабильность выполнения технологических операций и проводит квалификационные испытания образцов установочной серии (первой промышленной партии). Квалификационные испытания проводят также при постановке на производство продукции, ранее освоенной на другом предприятии или изготавливаемой по лицензии. Программу квалификационных испытаний подготавливает изготовитель с привлечением разработчика или держателя подлинников техни-

ческой документации. Испытания должны подтвердить, что отклонения основных параметров продукции, связанные с технологией производства, не выходят за допускаемые пределы, а недостатки продукции, выявленные приемочной комиссией, устранены. Результаты квалификационных испытаний оформляют протоколом (актом).

При отрицательных результатах квалификационных испытаний приемку продукции прекращают до устранения выявленных недостатков и получения положительных результатов повторных испытаний. Ранее принятую продукцию (в том числе поставленную потребителю) изготовитель дорабатывает или заменяет.

При положительных результатах квалификационных испытаний освоение производства считается законченным, а изготовленная продукция может поставляться заказчику (потребителю) по утвержденной документации.

## 1.2. Надежность технологических процессов

Согласно ГОСТу 27.002—89 **надежность** — это свойство объекта, в том числе технологического процесса, сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Применительно к технологическим процессам можно определить надежность как свойство обеспечивать в течение заданного промежутка времени изготовление продукции в соответствии с проектными количественными и качественными показателями<sup>2</sup>, т. е. поддерживать предусмотренный нормативными документами **уровень качества**.

---

<sup>2</sup> См.: *Марголит Р. Б.* Надежность технологических процессов : обзор. М. : Изд-во НИИмаш, 1984. 56 с.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

**Безотказность** — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

**Долговечность** — это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

**Ремонтпригодность** — это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

**Сохраняемость** — свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Для оценки надежности используются количественные показатели, которые имеют вероятностный характер. Так как надежность является комплексным свойством, то применяются количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

В качестве показателя безотказности используется, например, вероятность безотказной работы, т. е. того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. **Под наработкой** понимается продолжительность или объем работы объекта, а **отказ** — это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Вероятность безотказной работы определяется по формуле в соответствии с показательным распределением

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.1)$$

где  $t$  — продолжительность работы (наработка);  $\lambda$  — интенсивность отказов.

Величина  $\lambda$  обратно пропорциональна средней наработке до отказа  $T_0$ , т. е. наработке (во временном выражении) объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа:

$$\lambda = 1 / T_0. \quad (1.2)$$

Интенсивность отказов  $\lambda$  изменяется во времени согласно рис. 1.1<sup>3</sup> и включает три периода: период приработки (обкатки), период нормальной эксплуатации и период износа. Средний период устойчивый, первый и третий — неустойчивые.

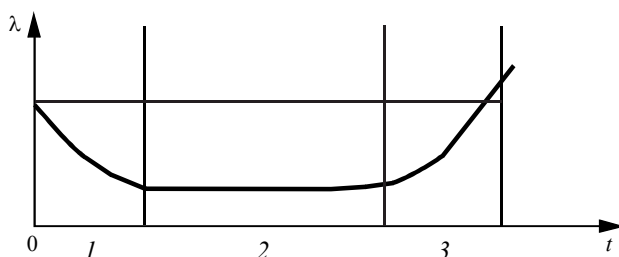


Рис. 1.1. Распределение интенсивности отказов в процессе эксплуатации: 1 — период приработки; 2 — период стабильной эксплуатации; 3 — период износа

Из формулы (1.1) видно, что в начале работы объекта после завершения приработки при  $t = 0$  вероятность безотказной работы  $P(0) = 1$ , по мере увеличения наработки вероятность безотказной работы уменьшается и стремится к 0, что иллюстрирует график на рис. 1.2.

Если технологический процесс состоит из нескольких последовательно выполняемых операций (например, поточная линия), то вероятность его безотказного функционирования определяется как произведение:

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \dots = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \cdot \dots = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots)t}. \quad (1.3)$$

<sup>3</sup> Рисунок см. в работе: Марголит Р. Б. Надежность технологических процессов. С. 8.

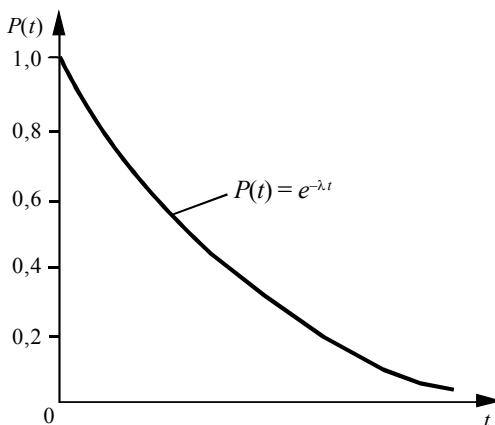


Рис. 1.2. Зависимость вероятности безотказной работы от времени

При параллельном выполнении некоторых операций надежность технологического процесса повышается. Например, вероятность безотказного функционирования части процесса из двух параллельно выполняемых операций А, В по теории вероятностей равна:

$$P_{AB} = P_A + P_B - P_A \cdot P_B,$$

или, с использованием формулы (1.1).

$$P_{AB} = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B) t}.$$

Повышение надежности систем с параллельным соединением элементов отражает сущность структурного резервирования, что будет рассмотрено ниже.

Долговечность оценивают, например, средним ресурсом (математическим ожиданием ресурса) или средним сроком службы объекта. Р е с у р с — это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Ремонтопригодность оценивают, например, в е р о я т н о с т ь ю в о с с т а н о в л е н и я, при кооторой время восстановления работоспособного состояния объекта не превышает заданное значение.



Для оценки сохраняемости используют, например, средний срок сохраняемости (математическое ожидание срока сохраняемости).

Если рассматривать технологический процесс как **технологическую систему (ТС)**, то элементами первого уровня являются технологические операции. Элементы второго и последующего уровней — это составные части технологических операций, которые могут быть разделены по времени (переход, рабочий ход и другие, перечисленные выше операции), по материальному оснащению (станок, заготовка, инструмент, смазка, электроэнергия, приборы контроля и т. п.), а также по участию человека в выполнении данной операции (ручной труд, механизированный или автоматизированный). Каждый из этих элементов обладает определенной качественной характеристикой (совокупностью показателей качества), из которых складывается качество всего технологического процесса.

Оценку надежности технологических систем (ТС) можно проводить по параметрам качества изготавливаемой продукции (ГОСТ 27.202—83).

Оценка надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции содержит:

- выбор номенклатуры показателей надежности;
- определение фактических значений показателей;
- сравнение фактических значений с требуемыми или базовыми значениями.

В зависимости от цели и задач оценки надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции используют следующие основные исходные данные:

- требуемые или базовые значения показателей надежности ТС;
- структуру и состав ТС;
- вид продукции, продолжительность процесса ее изготовления;
- объем производства;
- характеристики технического уровня и надежности технологического оборудования и оснастки;
- параметры точности заготовок;
- данные о нарушениях технологической дисциплины;

- предельные значения параметров изготавливаемой продукции;
- точностные характеристики используемых методов и средств контроля;
- результаты предшествующих оценок;
- статистические данные, полученные в процессе внедрения и эксплуатации ТС;
- данные отдела технического контроля и других служб предприятия о качестве продукции.

При выборе методов оценки надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции необходимо различать четыре вида (уровня рассмотрения) ТС:

- 1) технологическая операция;
- 2) технологический процесс;
- 3) ТС, действующие в пределах отдельного производственного подразделения (цех, участок и др.);
- 4) ТС предприятия.

В зависимости от вида ТС все показатели надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции подразделяют на четыре группы:

- 1) точность (технологического процесса и средств технологического оснащения);
- 2) технологическая дисциплина;
- 3) выполнение заданий по качеству (по параметрам качества продукции);
- 4) комплексные показатели.

Для оценки показателей надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции в зависимости от вида ТС и целей оценки следует использовать расчетные, опытно-статистические, регистрационные или экспертные методы.

Расчетные методы основаны на использовании математических моделей изменения параметров качества изготавливаемой продукции или параметров технологического процесса, с учетом физики отказов (качественной природы процессов износа, старения, температурных деформаций и т. п.) и имеющихся априорных данных о свойствах технологических систем данного

класса; на использовании данных о закономерностях изменения во времени факторов (износ инструмента, температурные и упругие деформации и т. п.), влияющих на один или одновременно несколько параметров качества изготавливаемой продукции.

Опытно-статистические (измерительные) методы основаны на использовании данных измерений параметров качества изготавливаемой продукции, полученных в результате специального выборочного обследования ТС и (или) специальных испытаний ТС и ее элементов.

Регистрационные методы не требуют проведения специального выборочного обследования и основаны на анализе информации, регистрируемой в процессе управления предприятием по технической документации, утвержденной в установленном порядке (результаты контроля точности технологических процессов, число принятых партий, дефектов и т. п.). Эта информация должна удовлетворять требованиям достоверности и однородности по ГОСТ 16468—79, а также быть достаточной для оценки значения искомого показателя.

Экспертные методы основаны на использовании результатов опроса экспертной группы, располагающей информацией о надежности данной технологической системы и факторах, влияющих на качество изготавливаемой продукции. Экспертные методы следует применять при невозможности или нецелесообразности использования расчетных, опытно-статистических или регистрационных методов (недостаточное количество информации, необходимость разработки специальных технических средств и т. п.). Состав экспертной группы и методика опроса — по ГОСТ 23554.0—79.

В качестве примера рассмотрим оценку надежности технологического процесса, состоящего из  $n$  последовательных операций (рис. 1.3)<sup>4</sup>.

В результате выполнения технологического процесса должны быть обеспечены  $m$  показателей качества изделий  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ .

---

<sup>4</sup> См.: Марголит Р. Б. Указ. соч. С. 19—20.

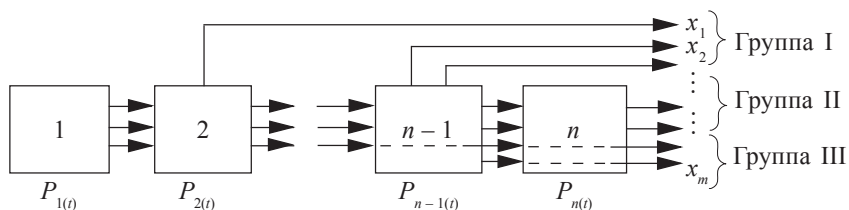


Рис. 1.3. Формирование показателей качества

Например:  $x_1$  — показатели точности изделий в пределах допустимых отклонений размеров;  $x_2$  — показатели эксплуатационных свойств (не ниже заданного уровня);  $x_3$  — показатели качества поверхности (по минимально возможному классу чистоты) и др. Вероятность выхода любого показателя качества за пределы установленных нормативами (ГОСТами, ТУ и др.) значений в течение наработки определяет безотказность данного технологического процесса.

Каждая операция характеризуется вероятностью  $P_i$  ее безотказного существования. Однако вероятность безотказного существования всего технологического процесса не равна (обычно выше) произведению соответствующих вероятностей (1.3) из-за особенностей формирования выходных показателей качества:

1) основное формирование показателей качества происходит на последних (финишных) операциях, однако часть показателей качества передаются с промежуточных операций (группа I на рис. 1.3);

2) большинство показателей качества финишных операций непосредственно определяют надежность технологического процесса (группа II);

3) имеются показатели качества финишных операций, на выполнение которых влияют предыдущие операции (группа III), т. е. имеет место технологическая наследственность.

Если для каждого показателя качества  $x_i$  определена вероятность  $P_{xi}$  его получения в соответствии с нормативными показателями, и на финише проводится выходной контроль, эффективность которого определяется вероятностью  $P_{ki}$  отбраковки изделия с показателем, не удовлетворяющим нормативному значению,

то для оценки вероятности безотказного функционирования технологического процесса предложена формула<sup>5</sup>:

$$P(t) = \prod_1^m [1 - (1 - P_{xi})(1 - P_{ki})].$$

Для неконтролируемых операций  $P_{ki} = 0$ , для абсолютно надежного контроля  $P_{ki} = 1$ .

Для повышения надежности технологических процессов возможны следующие пути<sup>6</sup>:

- 1) правильный выбор качественных характеристик элементов технологических процессов в соответствии с нагрузками на них;
- 2) сохранение надежности отдельных элементов в течение расчетного времени благодаря соответствующей системе эксплуатации;
- 3) сокращение количества элементов технологического процесса;
- 4) рационализация технологического процесса в результате параллельного соединения элементов, использования принципа резервирования, четкого выделения финишных операций, на которых формируются показатели качества;
- 5) реализация принципов приработки и обкатки на этапе освоения новых технологических процессов;
- 6) осуществление комплекса организационных, технологических и социальных мероприятий, направленных на повышение надежности деятельности операторов, снижение потерь за счет «человеческого фактора».

Один из эффективных путей повышения надежности — р е з е р в и р о в а н и е, предусматривающее увеличение количества резервных (параллельных) элементов технологических операций. Применяются два способа резервирования: 1) расширение зон обслуживания рабочих, обучение смежным профессиям, возможность перемещения рабочих на «узкие» места; 2) размещение резервного оборудования для выполнения работ на других, параллельно оборудованных, рабочих местах.

---

<sup>5</sup> См.: Марголит Р. Б. Указ. соч. С. 20.

<sup>6</sup> См.: Там же. С. 21.

## 2. ОСОБЕННОСТИ И ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОМД

### 2.1. Основные понятия теории ОМД

Теория ОМД базируется на основных положениях теории пластичности и оперирует характеристиками напряженно-деформированного состояния тела при его пластической деформации.

#### 2.1.1. Напряженное состояние

**Н а п р я ж е н и е** — это мера внешних или внутренних сил, вектор, имеющий величину и направление. В первом приближении напряжение можно определить как удельную силу, как отношение силы к площади поверхности, на которую действует эта сила. Размерность напряжения  $P_a = \text{Н/м}^2$ , в теории ОМД чаще пользуются размерностью  $\text{МПа} = \text{Н/мм}^2$ .

Более точно понятие напряжения вводится в курсе сопротивления материалов. Различают внешние и внутренние напряжения. Рассмотрим внешние напряжения, возникающие под действием приложенных к телу сил. Рассмотрим действие напряжения в декартовой системе координат  $x, y, z$  (рис. 2.1). Если  $\Delta S$  — элементарная площадка контактной поверхности тела в окрестности какой-то точки,  $\Delta P$  — часть силы, приходящейся на эту площадку, тогда вектором напряжения называется величина

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \overline{\Delta P} / \Delta S. \quad (2.1)$$

Или, применяя понятие производной,

$$p = dP / dS. \quad (2.2)$$

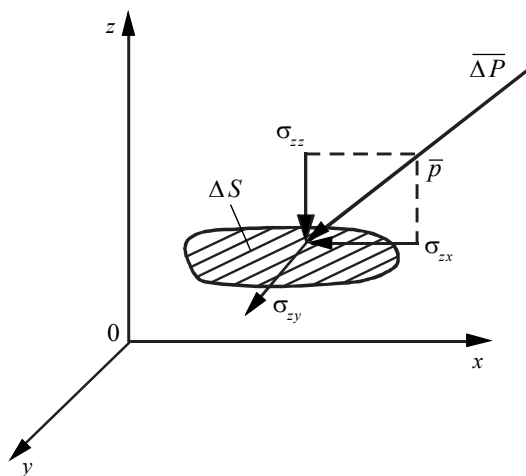


Рис. 2.1. Схема действия напряжений

Вектор напряжения раскладывают на составляющие вдоль координатных осей, в данном случае это  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{zy}$ .

На рис. 2.1 оси выбраны так, что ось  $z$  направлена перпендикулярно площадке  $\Delta S$ , а оси  $x$  и  $y$  — в ее плоскости. Напряжение, действующее перпендикулярно данной площадке, называется нормальным (в данном случае это  $\sigma_{zz}$ ). Напряжение, действующее в плоскости, называется касательным ( $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{zy}$ ).

Напряжение условно считают положительным (растягивающим), если его направление совпадает с координатной осью, на рис. 2.1 это напряжение  $\sigma_{zy}$ . Отрицательное (сжимающее) напряжение направлено против координатной оси, в рассматриваемом случае это  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{zx}$ .

В теории ОМД нормальное напряжение, действующее на инструмент, обычно называют давлением, а касательные нормальные напряжения представляют собой **н а п р я ж е н и я т р е н и я**. В данном случае (рис. 2.1) вектор напряжения трения

$$\tau = \sigma_{zx} + \sigma_{zy}.$$

Напряжения трения и давления связаны, в частности, законом Кулона:

$$\tau = fp,$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $p = -\sigma_{zz}$  — нормальное давление.

В любом процессе ОМД сила деформации и сила, действующая на инструмент (валки, оправки, бойки и т. п.), рассчитываются одинаково: нормальное давление умножается на площадь контактной поверхности. В общем случае сила деформации рассчитывается по уравнению (2.2):

$$P = \int_0^{S_k} p dS, \quad (2.3)$$

где  $S_k$  — площадь контактной поверхности.

Обычно полагают, что давления распределены равномерно по контактной поверхности, а контактную поверхность заменяют ее горизонтальной проекцией, и формулу (2.3) используют в упрощенном виде:

$$P = pS_k,$$

где  $p$  — среднее нормальное давление.

Аналогично вводится понятие внутренних напряжений. В интересующей точке деформируемого тела рассматривается ориентированная определенным образом площадка, тело мысленно пересекается плоскостью, проходящей через рассматриваемую площадку, действие отброшенной части заменяется силой, и рассматривается часть силы, действующая на выделенную площадку в соответствии с рис. 2.1. Далее рассуждения повторяются как при рассмотрении поверхностных напряжений. В общем случае в окрестности данной точки в декартовой системе координат можно выделить три взаимно перпендикулярные площадки (границы элементарного параллелепипеда) и на каждой площадке рассмотреть три проекции вектора напряжений аналогично рис. 2.1. Эти девять проекций составляют тензор напряжений второго ранга:



$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Для сокращения записи принято использовать тензорные обозначения и тензор записывать в виде  $\mathbf{T}_\sigma = (\sigma_{ij})$ , где  $i, j$  принимают значения  $x, y, z$ .

С помощью тензора напряжений можно найти напряжения на любой наклонной площадке в выбранной системе координат:

$$p_j = \sigma_{ij} n_i,$$

где  $n_i$  — направляющие косинусы между нормалью к площадке и соответствующей осью координат.

$$\text{Например, } p_x = \sigma_{xx} n_x + \sigma_{yx} n_y + \sigma_{zx} n_z.$$

Из условия равенства нулю суммы моментов всех сил, приложенных к элементарному параллелепипеду, можно получить закон парности касательных напряжений  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ , т. е. касательные напряжения, расположенные симметрично главной диагонали тензора напряжений (2.4), равны друг другу. Поэтому тензор напряжений называется симметричным.

Возникающие в деформируемом теле напряжения удовлетворяют трем уравнениям равновесия, которые при отсутствии массовых и инерционных сил записываются с учетом правила суммирования по повторяющимся индексам:

$$\sigma_{ij,j} = 0.$$

В развернутом виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial \sigma_{xx} / \partial x + \partial \sigma_{xy} / \partial y + \partial \sigma_{xz} / \partial z = 0 \\ \partial \sigma_{yx} / \partial x + \partial \sigma_{yy} / \partial y + \partial \sigma_{yz} / \partial z = 0 \\ \partial \sigma_{zx} / \partial x + \partial \sigma_{zy} / \partial y + \partial \sigma_{zz} / \partial z = 0 \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Главные нормальные напряжения действуют на площадках, на которых отсутствуют касательные напряжения, они обозначаются  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$ . Индексы при главных нормальных напряжениях назначают по правилу:  $\sigma_{11} \geq \sigma_{22} \geq \sigma_{33}$ . Тензор напряжений через главные напряжения записывается так:

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}.$$

Схемы напряженного состояния различаются направлением напряжений и их наличием по каким-либо осям. Возможные схемы разделяют на три группы (рис. 2.2), включающие девять различных схем.

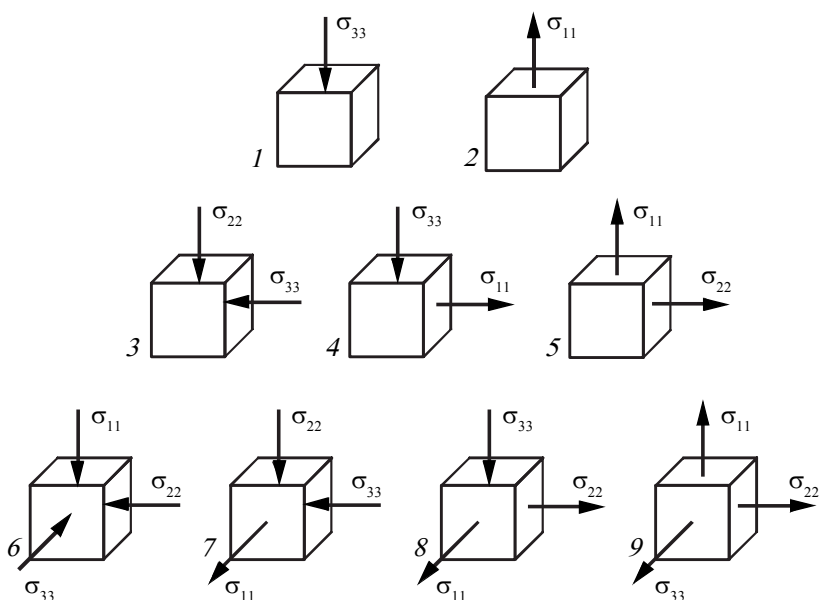


Рис. 2.2. Схемы напряженного состояния:

1—2 — линейные; 3—5 — плоские; 6—9 — объемные

Уровень нормальных напряжений в некоторой точке деформируемого тела характеризуют средним нормальным напряжением

$$\sigma = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3 = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3 = \sigma_{ii}/3.$$

Напряженное состояние характеризует также интенсивность касательных напряжений

$$T = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2]}. \quad (2.6)$$

Название этой величины поясняет понятие главных касательных напряжений:

$$\sigma_{12} = (\sigma_{11} - \sigma_{22})/2; \sigma_{23} = (\sigma_{22} - \sigma_{33})/2; \sigma_{13} = (\sigma_{33} - \sigma_{11})/2. \quad (2.7)$$

С учетом этого

$$T = \sqrt{\frac{1}{24} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}.$$

Таким образом,  $\sigma$  характеризует действие нормальных напряжений, а  $T$  — касательных. В общем схему напряженного состояния оценивают безразмерным показателем напряженного состояния  $\sigma/T$ . Отрицательные значения  $\sigma/T$  свидетельствуют о преобладании сжимающих напряжений, а положительные — растягивающих. С точки зрения возможности разрушения наиболее опасны растягивающие напряжения, т. е. положительные значения  $\sigma/T$ . От показателя напряженного состояния сильно зависит пластичность металла, т. е. способность деформироваться без макроскопического разрушения, о чем будет сказано далее.

### 2.1.2. Деформированное состояние

**Д е ф о р м а ц и я** — это изменение формы и размеров тела. Для оценки этих изменений применяют различные характеристики. Деформация происходит за определенный промежуток

времени. В процессе деформации под действием внешних сил все точки тела перемещаются и изменяется их взаимное положение. Рассмотрим деформацию двух взаимно перпендикулярных отрезков  $AB$  и  $AC$  вблизи точки  $A$  в плоскости  $xOy$  (рис. 2.3). После деформации точка  $A$  переместилась в положение  $A_1$ , а отрезки заняли положение  $A_1B_1$  и  $A_1C_1$ . Вектор перемещения точки  $A$  при пластической деформации обозначен  $\bar{U}$ , его проекции на оси координат  $U_x$  и  $U_y$ .

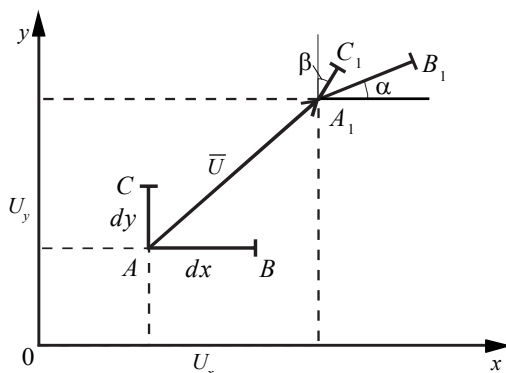


Рис. 2.3. Малые деформации в окрестности точки

Линейные деформации оцениваются отношением удлинения или укорочения отрезка к его исходной длине. В данном случае деформации (относительные удлинения) вдоль соответствующих осей при допущении малости углов  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{A_1B_1 - AB}{AB}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{A_1C_1 - AC}{AC}.$$

Относительные удлинения могут быть растягивающими (положительными) и сжимающими (отрицательными). В данном случае (см. рис. 2.3) деформация вдоль оси  $y$  отрицательна:  $\varepsilon_{yy} < 0$ , а вдоль оси  $x$  — положительна:  $\varepsilon_{xx} > 0$ .

Деформации сдвига оцениваются изменением углов, в данном случае

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\alpha + \beta}{2}.$$

Используя дифференциальные соотношения и некоторые упрощения, считая деформации малыми (не более 0,1) и отрезки прямолинейными, можно получить следующие дифференциальные соотношения Коши в плоскости  $xOy$  (см. рис. 2.3) для определения относительных удлинений и сдвигов:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right). \quad (2.8)$$

В общем случае вблизи точки рассматривают элементарный параллелепипед с ребрами  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . При деформации изменяются линейные размеры ребер (но линии остаются прямыми), изменяются углы между ребрами. Линейная деформация параллелепипеда связана с изменением его объема. Угловая деформация сдвига не связана с изменением объема, а приводит к изменению формы тела. Рассматривая деформации граней параллелепипеда, можно записать еще шесть дифференциальных соотношений, подобных (2.8), и ввести тензор малых деформаций, который определяет деформированное состояние в окрестности произвольной точки деформируемого тела:

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}.$$

Деформации тела называются малыми порядка  $\delta \ll 1$ , если для любых  $i, j$  в каждой точке в данный момент времени  $|\varepsilon_{ij}| \leq \delta$ , и величиной  $\delta^2$  можно пренебречь. Обычно принимается  $\delta = 0,1$ .

Линейные деформации могут приводить к изменению объема тела, поэтому для несжимаемого тела их сумма должна быть равной нулю. Это условие называется **у с л о в и е м   п о с т о я н с т в а   о б ъ е м а   и л и   н е с ж и м а е м о с т и**:

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \varepsilon_{ij} = 0, \quad (2.9)$$

где  $\varepsilon_{11} > \varepsilon_{22} > \varepsilon_{33}$  — главные деформации (удлинения), направленные по трем ортогональным главным осям, между которыми отсутствуют сдвиги. Тензор деформаций в главных осях записывается в виде

$$\mathbf{T}_\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix}.$$

Можно также найти плоскости, на которых действуют главные сдвиги:

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}; \quad \varepsilon_{23} = \varepsilon_{22} - \varepsilon_{33}; \quad \varepsilon_{31} = \varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}. \quad (2.10)$$

Для оценки общей величины деформации применяют интенсивность деформаций сдвига

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3} [(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2]}, \quad (2.11)$$

смысл названия которой становится понятен, если учесть соотношения (2.10) и записать  $\Gamma$  через главные сдвиги:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2)}.$$

В случае несжимаемого материала достаточно определить две главные деформации, а третью — из условия (2.9), например:

$$\varepsilon_{22} = -\varepsilon_{11} - \varepsilon_{33}.$$

Тогда выражение (2.11) можно записать в упрощенном виде:

$$\Gamma = 2\sqrt{\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}\varepsilon_{33} + \varepsilon_{33}^2}. \quad (2.12)$$

Из условия несжимаемости (2.9) следует, что все три главные деформации не могут иметь одинаковый знак. Возможны только разноименные схемы, показанные на рис. 2.4, и реально осуществимы одна плоская (рис. 2.4, б) и две объемные (рис. 2.4, а, в) схемы.

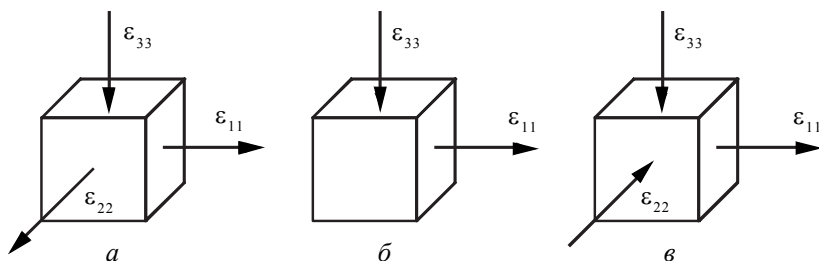


Рис. 2.4. Возможные схемы деформированного состояния:

а, в — объемные; б — плоская

Различают следующие виды деформаций: упругая, пластическая, однородная, равномерная, горячая, холодная, монотонная, немонотонная (знакопеременная), малая, большая.

**У п р у г а я д е ф о р м а ц и я** — обратимая, после снятия нагрузки тело восстанавливает свои форму и размеры.

**П л а с т и ч е с к а я д е ф о р м а ц и я** — необратимая, остается после снятия нагрузки.

Переход от упругих деформаций к пластическим наглядно иллюстрирует диаграмма растяжения (рис. 2.5) в координатах осевое напряжение — осевая деформация. Для начального участка диаграммы характерна прямая пропорциональность между напряжением и деформацией:

$$\sigma_{xx} = E \cdot \varepsilon_{xx}, \quad (2.13)$$

где  $E$  — модель упругости (модуль Юнга).

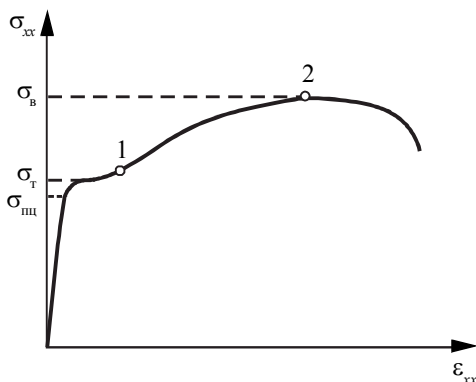


Рис. 2.5. Диаграмма растяжения образца:

$\sigma_{пц}$  — предел пропорциональности;  $\sigma_t$  — предел текучести;  $\sigma_v$  — временное сопротивление

Выражение (2.13) носит название закона Р. Гука, установленного в 1660 г.

Максимальное напряжение, соответствующее закону (2.13), называется пределом пропорциональности  $\sigma_{пц}$ . Далее наблюдается отклонение от прямопропорциональной зависимости.

Участок, параллельный оси абсцисс, называют площадкой текучести. Напряжение, при котором образуется площадка текучести, называется пределом текучести  $\sigma_t$ . В тех случаях, когда материал не имеет явно выраженной площадки текучести, за предел текучести принимают напряжение, при котором остаточная деформация не превышает 0,2 %. Такое напряжение называют условным пределом текучести  $\sigma_{0,2}$ . Начиная с точки 2 диаграммы на образце появляется местное сужение (шейка), деформация становится неравномерной. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей образованию шейки (точка 2), называется временным сопротивлением  $\sigma_v$ .

Важная для теории и практики ОМД часть диаграммы (1—2) — кривая упрочнения (рис. 2.6). Напряжения в этой части называются сопротивлением деформации  $\sigma_s$ .



Это напряжения одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации. Очевидно, что при одноосном растяжении  $\sigma_s = \sigma_{xx} = \sigma_{11}$ , а  $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ . Интенсивность касательных напряжений, рассчитываемая по формуле (2.6), в этом случае  $T = \sigma_s / \sqrt{3}$ .

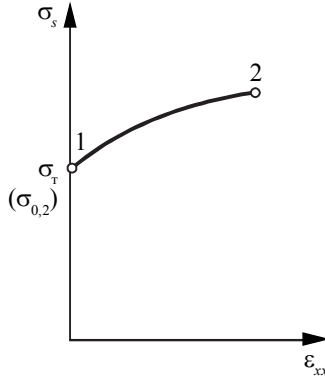


Рис. 2.6. Кривая упрочнения:

$\sigma_{0,2}$  — условный предел текучести;  $\sigma_s$  — сопротивление деформации

Часто при решении теоретических задач ОМД упругой частью деформации пренебрегают, так как она составляет не более 0,3 %. Кривую упрочнения обычно аппроксимируют степенной зависимостью

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + b\varepsilon^c, \quad (2.14)$$

где  $b, c$  — эмпирические коэффициенты.

Условия перехода от упругих деформаций к пластическим называют условиями пластичности. Широко используются два условия:

1) условие Треска — Сен-Венана

$$\sigma_{11} - \sigma_{33} = \beta \sigma_\tau, \quad (2.15)$$

где коэффициент  $\beta = 1$  — для осесимметричной деформации и  $\beta = 1,15$  — для плоской деформации;

2) условие Губера — Мизеса

$$T = \sigma_t / \sqrt{3} = \tau_s, \quad (2.16)$$

где  $\tau_s$  — предел текучести при чистом сдвиге.

Смысл условия (2.15) состоит в том, что пластическая деформация начинается при достижении максимальным касательным напряжением (см. формулы (2.7)) определенной величины (предела текучести на сдвиг).

Условие (2.16) называется энергетическим; предполагается, что материал пластически деформируется, когда интенсивность касательных напряжений достигает определенной величины. Условие (2.16) часто называют *у с л о в и е м и д е а л ь н о й п л а с т и ч н о с т и*, которое используют при решении теоретических задач.

*О д н о р о д н о й* называется деформация тела, при которой главные оси имеют одинаковые направления во всех точках тела и остаются неизменными в течение всего процесса деформирования. Это означает, что при однородной деформации отсутствуют сдвиги. При однородной деформации компоненты перемещений линейно зависят от координат, т. е. имеет место широко применяемая в теории ОМД гипотеза плоских сечений.

*Р а в н о м е р н о й* называется такая деформация, тензор которой постоянен в любой точке тела, т. е. не зависит от ее координат. Равномерная деформация представляет собой частный случай однородной; она возможна в условиях линейного напряженного состояния.

*Г о р я ч а я* деформация производится при температуре металла, равной температуре его рекристаллизации или выше ее. Если температура обрабатываемого металла ниже температуры рекристаллизации, то такая деформация называется *х о л о д н о й*. Температура рекристаллизации  $\theta_{\text{рек}} = (0,4—0,6) \theta_{\text{пл}}$  К, где  $\theta_{\text{пл}}$  К — температура плавления металла или сплава в кельвинах; коэффициент 0,4 соответствует чистым металлам, а 0,6 — сплавам. Связь между значениями температуры по шкале Кельвина ( $\theta$  К) и шкале Цельсия имеет вид  $\theta \text{ К} = \theta \text{ }^\circ\text{C} + 273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Например, деформация свинца при комнатной температуре (293 К) является горячей, т. к.  $\theta_{\text{пл}} \text{ К} = 327^\circ\text{С} + 273,15^\circ\text{С} = 600,15 \text{ К}$ , а температура рекристаллизации  $\theta_{\text{рек}} = 0,4 \theta_{\text{пл}} \text{ К} = 240 \text{ К}$ . Таким образом, температура обработки выше температуры рекристаллизации.

**М о н о т о н н а я** — такая деформация, при которой на каждой ступени в процессе значительного формоизменения остаются постоянными отношения  $\varepsilon_{11} : \varepsilon_{22} : \varepsilon_{33}$  и направления главных удлинений связаны с одними и теми же материальными волокнами.

**Существенно немонотонным** (з н а к о п е р е м е н н ы м) называют деформирование, при котором по крайней мере один раз изменилось направление деформации в некотором материальном направлении (удлинение сменилось укорочением или наоборот).

Для перехода к большим деформациям траекторию движения частицы делят на прямолинейные участки, соответствующие малым деформациям. На каждом участке вычисляют  $\Gamma_i$  и, считая их аддитивными, определяют суммарную степень деформации (сдвига)

$$\Lambda = \sum \Gamma_i.$$

Характеристики **б о л ь ш и х** (к о н е ч н ы х) деформаций определяют интегрированием. Например, конечное монотонное удлинение тела с  $L_0$  до  $L_k$  вдоль оси  $x$  можно оценить через логарифмическую деформацию:

$$\varepsilon_{xx} = \int_{L_0}^{L_k} \frac{dx}{x} = \ln \frac{L_k}{L_0}. \quad (2.17)$$

Логарифмические деформации обладают свойством аддитивности (их можно суммировать) при многоэтапном деформировании. Например, если удлинение происходит в 3 этапа  $L_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_k$ , то логарифмическая деформация на первом этапе

$$\varepsilon_{xx} = \ln \frac{L_1}{L_0}, \text{ на втором — } \varepsilon_{xx(2)} = \ln \frac{L_2}{L_1}, \text{ на третьем — } \varepsilon_{xx(3)} = \ln \frac{L_k}{L_2}.$$

Итоговая деформация

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx(1)} + \varepsilon_{xx(2)} + \varepsilon_{xx(3)} = \ln \left( \frac{L_1}{L_0} \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{L_{\kappa}}{L_2} \right) = \ln \frac{L_{\kappa}}{L_0}.$$

В инженерных расчетах для характеристики удлинения изделий применяют коэффициент вытяжки. Суммарный коэффициент вытяжки равен отношению конечной длины к начальной, для цилиндрических тел — отношению исходной площади поперечного сечения к конечной:

$$\mu = \frac{L_{\kappa}}{L_0} = \frac{F_0}{F_{\kappa}}. \quad (2.18)$$

Итоговый коэффициент вытяжки при многоэтапном деформировании определяется умножением. Для рассматриваемого примера

$$\mu = \mu_1 \mu_2 \mu_3 = \frac{L_1}{L_0} \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{L_{\kappa}}{L_2} = \frac{L_{\kappa}}{L_0}.$$

Вычислим, например, характеристики деформированного состояния при однородной деформации параллелепипеда исходных размеров  $H_0$  (высота),  $B_0$  (ширина),  $L_0$  (длина) до конечных  $H_1$ ,  $B_1$ ,  $L_1$  путем обжатия по высоте с увеличением ширины (уширением) и длины (вытяжкой). Условие постоянства объема тела

$$H_0 B_0 L_0 = H_1 B_1 L_1.$$

После деления правой части на левую условие примет вид

$$\frac{H_1}{H_0} \cdot \frac{B_1}{B_0} \cdot \frac{L_1}{L_0} = 1,$$

где  $\frac{B_1}{B_0}$  — коэффициент уширения;  $\mu = \frac{L_1}{L_0}$  — коэффициент вытяжки.

Прологарифмируем последнее выражение:

$$\ln \frac{H_1}{H_0} + \ln \frac{B_1}{B_0} + \ln \mu = 0,$$

или

$$\varepsilon_H + \varepsilon_B + \varepsilon_L = 0.$$

Если считать слагаемые последнего выражения главными логарифмическими деформациями (причем  $\varepsilon_L > 0$ ,  $\varepsilon_B > 0$ ,  $\varepsilon_H < 0$ ), то оно совпадает с условием несжимаемости (2.9) и по сути является условием постоянства объема.

**Скорость деформации** — это изменение относительной деформации в единицу времени. Например, скорость относительного удлинения

$$\xi_{xx} = \partial \varepsilon_{xx} / \partial t. \quad (2.19)$$

Так как относительная деформация — величина безразмерная, скорость деформации имеет размерность  $1/c$ .

Перемещения и деформации, показанные на рис. 2.3, могут произойти с различной скоростью. Знать скорости деформации особенно важно в случае горячей обработки, так как имеет место скоростное упрочнение. Скорость перемещения точки А в положение А<sub>1</sub> (см. рис. 2.3) определяется как  $v = \partial U / \partial t$ , а скорости линейных перемещений

$$v_x = \frac{\partial U_x}{\partial t}; \quad v_y = \frac{\partial U_y}{\partial t}. \quad (2.20)$$

Уточним выражение (2.19), используя (2.8) и (2.20):

$$\xi_{xx} = \partial \varepsilon_{xx} / \partial t = \partial \left( \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) / \partial t = \partial \left( \frac{\partial (v_x \partial t)}{\partial x} \right) / \partial t = \frac{\partial v_x}{\partial x}.$$

Аналогично можно вычислить остальные компоненты тензора скоростей деформаций:

$$\xi_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y}; \quad \xi_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \text{ и т. д.} \quad (2.21)$$

Тензор скоростей деформаций имеет вид

$$\mathbf{T}_{\xi} = \begin{pmatrix} \xi_{xx} & \xi_{xy} & \xi_{xz} \\ \xi_{yx} & \xi_{yy} & \xi_{yz} \\ \xi_{zx} & \xi_{zy} & \xi_{zz} \end{pmatrix}.$$

Условие несжимаемости можно записать через скорости деформаций:

$$\xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = \xi_{11} + \xi_{22} + \xi_{33} = \xi_{ii} = 0,$$

где  $\xi_{11} > \xi_{22} > \xi_{33}$  — главные скорости деформаций (удлинений), направленные по трем ортогональным главным осям. Тензор скоростей деформаций в главных осях записывается в виде

$$\mathbf{T}_{\xi} = \begin{pmatrix} \xi_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33} \end{pmatrix}.$$

Для оценки скорости деформации применяют также интенсивность скоростей деформаций сдвига

$$H = \sqrt{\frac{2}{3} [(\xi_{11} - \xi_{22})^2 + (\xi_{22} - \xi_{33})^2 + (\xi_{33} - \xi_{11})^2]}. \quad (2.22)$$

Степень деформации сдвига, накопленную при движении частицы, рассчитывают по формуле

$$\Lambda = \int_0^t H dt, \quad (2.23)$$

где  $t$  — время деформации, а интегрирование ведется вдоль траектории движения частицы.

### 2.1.3. Сопротивление деформации

Сопротивление деформации  $\sigma_s$  — это напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации.

Эта величина играет важную роль в технологических расчетах процессов ОМД и во многом определяет усилие деформирования. Сопротивление деформации зависит также от природы и химического состава обрабатываемых металлов.

В общем случае на сопротивление деформации данного сплава влияют степень деформации, скорость деформации и температура. Чаще всего используются зависимости вида

$$\sigma_s = a_1 \Lambda^{a_2} N^{a_3} \exp(-a_4 \theta), \quad (2.24)$$

где  $a_1 \dots a_4$  — эмпирические коэффициенты;  $\theta$  — температура.

В качестве характеристик степени и скорости деформации могут использоваться другие величины, например логарифмические деформации (2.17) и их скорости.

Зависимость (2.24) отражает процессы скоростного и деформационного упрочнения при пластической деформации, т. е. сопротивление деформации увеличивается с ростом степени и скорости деформации. При нагреве сопротивление деформации падает. При холодной деформации скоростным упрочнением пренебрегают, используя зависимость (2.14).

Формулы (2.14) и (2.24) получают опытным путем при осадке, растяжении или кручении цилиндрических образцов. При исследовании влияния скорости деформации используют специальные испытательные машины, называемые пластометрами.

### 2.1.4. Система дифференциальных уравнений теории пластичности

Допуская изотропность и несжимаемость деформируемого тела, считая деформацию изотермической (протекающей при постоянной температуре), стационарной (без массовых и инерцион-

ных сил), пренебрегая упругими составляющими деформации, задачу теории пластичности можно свести к определению в каждой точке объема деформируемого тела в данный момент времени при заданных граничных условиях на наружной поверхности тела следующих величин:

— 6 компонентов тензора напряжений (2.4) (с учетом его симметричности);

— 6 компонентов тензора деформаций или скоростей деформаций;

— 3 компонента вектора перемещений или скорости течения.

Итого — 15 неизвестных функций.

Для их определения используется система дифференциальных уравнений, включающая

— 3 дифференциальных уравнения равновесия (2.5);

— 6 выражений компонентов тензора деформаций или скоростей деформаций через компоненты вектора перемещений (2.8) или скорости течения (2.21);

— 6 уравнений связи компонентов тензора напряжений с компонентами тензоров деформаций или скоростей деформаций, например:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} - \sigma = \frac{2T(H)}{H} \xi_{xx}; \\ \sigma_{yy} - \sigma = \frac{2T(H)}{H} \xi_{yy}; \\ \sigma_{zz} - \sigma = \frac{2T(H)}{H} \xi_{zz}; \\ \sigma_{xy} = \frac{2T(H)}{H} \xi_{xy}; \\ \sigma_{xz} = \frac{2T(H)}{H} \xi_{xz}; \\ \sigma_{yz} = \frac{2T(H)}{H} \xi_{yz}, \end{array} \right. \quad (2.25)$$



где  $T = \sigma_s / \sqrt{3}$  — интенсивность касательных напряжений; функция  $T(H)$  определяется из эксперимента (например, в виде (2.24)).

Итого 15 уравнений. Таким образом, приведенная система уравнений является замкнутой.

Используют различные виды функций  $T(H)$ , характеризующие модели деформируемых сред (рис. 2.7). На рис. 2.7 представлены некоторые примеры моделей сред.

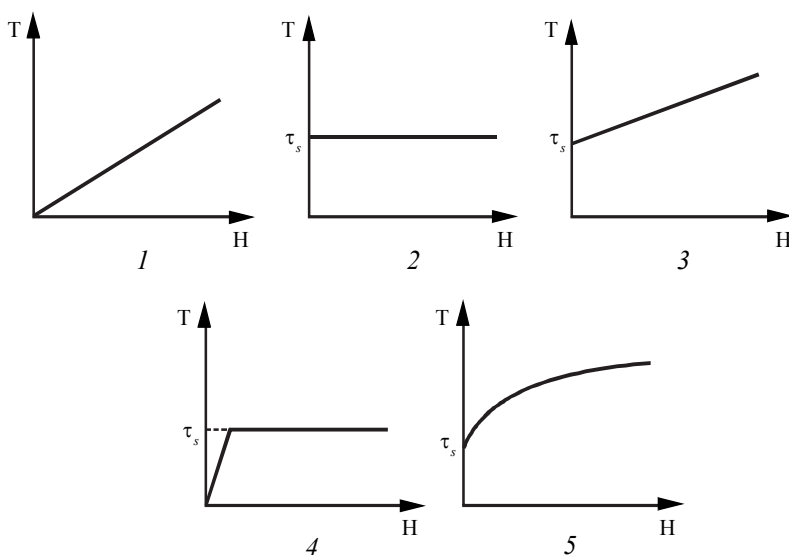


Рис. 2.7. Модели пластических сред:

1 — линейновязкая  $T = \mu H$ , где  $\mu$  — коэффициент вязкости; 2 — идеальнопластическая  $T = \tau_s$ ; 3 — вязкопластическая  $T = \tau_s + \mu H$ ; 4 — вязкоидеальнопластическая (комбинация 1 и 2); 5 — жесткопластическая  $T = \tau_s + \mu H^c$

Сформулированная задача называется к р а е в о й з а д а ч е й т е о р и и п л а с т и ч н о с т и. Ее решение в общем виде очень трудоемко, может быть выполнено только с помощью ЭВМ. Для решения задач на ЭВМ применяют следующие упрощающие методы: 1) линеаризации (замена модели среды упругой или линейновязкой) и сведения системы уравнений к линейной; 2) вари-

ционный (сведения решения к минимизации функционала или решению системы линейных уравнений); 3) граничных интегральных уравнений. Для формирования достаточно общих алгоритмов применяют различные методы дискретизации (дробления) объема деформированного тела: 1) метод конечных элементов, 2) метод конечных разностей, 3) метод граничных элементов. На основе алгоритмов разрабатывают пакеты прикладных программ для решения различных краевых задач. В последнее время наиболее быстро развивается метод конечных элементов.

При решении инженерных задач краевую задачу сводят к плоской или осесимметричной, при этом уменьшается число неизвестных. Так, для плоской (двумерной) задачи число неизвестных сокращается с 15 до 8 (3 компонента тензора напряжений, 3 компонента тензора деформаций, 2 компонента вектора перемещений). Для решения применяют чаще всего инженерный метод и метод линий скольжения.

### 2.1.5. Пластичность и разрушение

П л а с т и ч н о с т ь — это способность металла деформироваться без разрушения. Количественная мера пластичности — с т е п е н ь д е ф о р м а ц и и с д в и г а, накопленная к моменту разрушения:

$$\Lambda_p = \int_0^{t_p} H dt, \quad (2.26)$$

где  $t_p$  — время деформации до разрушения.

Величину  $\Lambda_p$  также называют п л а с т и ч н о с т ь ю и определяют экспериментально путем исследования влияния на пластичность схемы напряженного состояния. Основной характеристикой, влияющей на пластичность, является показатель напряженного состояния  $\sigma/T$ . В результате испытаний строят д и а г р а м м у п л а с т и ч н о с т и  $\Lambda_p = f(\sigma/T)$  (рис. 2.8).

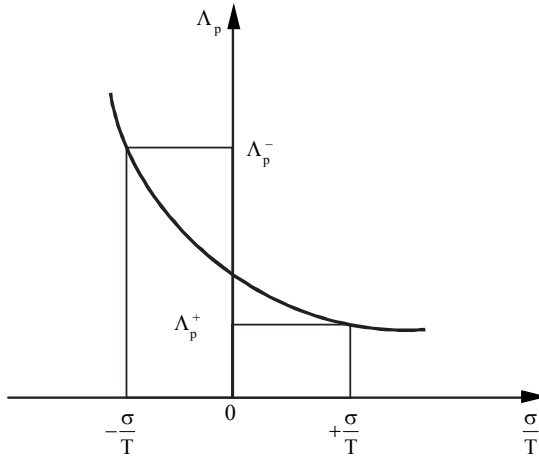


Рис. 2.8. Диаграмма пластичности

Диаграмма имеет области положительных и отрицательных значений  $\sigma/T$ . Отрицательные значения  $\sigma/T$  свидетельствуют о преобладании сжимающих напряжений, а положительные — о преобладании растягивающих. С точки зрения возможности разрушения наиболее опасны растягивающие напряжения, т. е. положительные значения  $\sigma/T$ .

Из рис. 2.8 видно, что положительные значения  $\sigma/T$  соответствуют меньшим значениям пластичности:  $\Lambda_p^+ < \Lambda_p^-$ .

По существу, пластичность является предельной степенью деформации сдвига, которую выдерживает металл без разрушения при данной схеме напряженного состояния. Поэтому условие деформирования без разрушения имеет вид

$$\Lambda < \Lambda_p. \quad (2.27)$$

Если использовать относительную величину  $\psi = \Lambda/\Lambda_p$ , называемую степенью использования ресурса пластичности, то условие (2.27) будет иметь вид

$$\psi < 1. \quad (2.28)$$

Очевидно, что до деформации  $\psi = 0$ , в момент разрушения, когда  $\Lambda = \Lambda_p$ ,  $\psi = 1$ .

В настоящее время применяется кинетический подход к проблеме разрушения металлов, так как деформирование тела сопровождается накоплением повреждений. С учетом этого и принимая во внимание выражение (2.23), уточним условие (2.28):

$$\psi = \int_0^t \frac{H dt}{\Lambda_p} < 1, \quad (2.29)$$

где интегрирование ведется вдоль траектории движения частицы.

Экспериментальная проверка модели (2.29) для различных условий деформирования (особенно для знакопеременной деформации) показала, что возможно значительное отклонение от экспериментальных данных в сторону увеличения. Поэтому дальнейшее уточнение модели (2.29) для случая монотонной холодной деформации предложено в виде

$$\omega = \int_0^{\Lambda} \frac{a \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda < 1, \quad (2.30)$$

где  $\omega$  — поврежденность металла:  $a > 1$  — коэффициент, учитывающий уменьшение поврежденности при знакопеременной деформации.

Интегрирование выражения (2.30) при  $\sigma/T = \text{const}$  дает

$$\omega = \frac{a \Lambda^a}{a \Lambda_p^a} \Big|_0^{\Lambda} = \left( \frac{\Lambda}{\Lambda_p} \right)^a < 1,$$

т. е. уменьшает значения, подсчитанные по (2.28):  $\omega = \psi^a$ .

**П о в р е ж д е н н о с т ь** — это степень пораженности металла микродефектами. Считается, что у исходного недеформированного металла  $\omega = 0$ , в момент разрушения  $\omega = 1$ . Экспериментально определены два пороговых значения поврежденности:

1) при  $\omega_* = 0,25 \dots 0,30$  в металле образуются микропоры, не устраняемые при термообработке;

2) при  $\omega_{**} = 0,65 \dots 0,70$  цепочки микропор образуют зародыши микротрещин, снижающие эксплуатационные свойства изделий.

В общем случае критерий деформирования без разрушения А. А. Богатова в холодном состоянии записывается в виде

$$\omega = \sum_{j=1}^k \left( \sum_{i=1}^{n_j} \int_0^{\Lambda_i} \frac{a \Lambda^{a-1}}{\Lambda_p^a} d\Lambda - \Delta\omega_j \right) < 1,$$

где  $n_j$  — число этапов знакопеременной деформации в  $j$ -м цикле пластической и термической обработки;  $k$  — число таких циклов;  $\Delta\omega_j$  — уменьшение поврежденности металла на  $j$ -м цикле термической обработки<sup>1</sup>.

### 2.1.6. Работа и мощность пластической деформации

Работа как произведение силы на перемещение в теории ОМД рассчитывается так:

$$dA = p \cdot dS \cdot u,$$

где  $dA$  — элементарная работа;  $p \cdot dS$  — сила (см. формулу (2.2));  $u$  — перемещение. Размерность работы  $Dж = Н \cdot м$ .

Мощность характеризует работу в единицу времени:  $N = dA/dt$ , ее размерность  $Вт = Дж/с$ .

Пластическая деформация совершается внешними силами, приложенными со стороны инструмента. Нагрузки, действующие на часть поверхности тела  $S$ , могут быть заданы в напряжениях либо в скоростях (перемещениях). Часть поверхности  $S$  может быть свободной от воздействий. Вся поверхность тела рассматривается состоящей из следующих частей:

$$S = S_f + S_v + S_s,$$

где  $S_f$  — поверхность, на которой заданы поверхностные напряжения  $p_i^*$ ;  $S_v$  — поверхность, на которой заданы скорости перемеще-

---

<sup>1</sup> Физическое металловедение: учеб. для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов, В. П. Швейкин. Екатеринбург : Изд-во УГТУ—УПИ, 2001. С. 299.

ний инструмента  $v_i^*$  (часто эту поверхность называют зоной прилипания);  $S_s$  — поверхность, на которой заданы условия скольжения металла относительно инструмента (задан закон трения).

Скорость скольжения равна разности скоростей металла и инструмента:

$$v_s = v - v^*. \quad (2.31)$$

Мощность сил трения

$$N_{\text{тр}} = \iint_{S_s} \tau v_s ds,$$

где  $\tau$  — напряжение трения.

Работа поверхностных сил

$$A_{\text{п}} = \iint_{S_f} p_i^* u_i ds,$$

где  $u_i$  — перемещения, вызванные заданными напряжениями.

Мощность поверхностных сил

$$N_{\text{п}} = \iint_{S_f} p_i^* v_i ds,$$

где  $v_i$  — скорости, вызванные заданными напряжениями.

Если нагрузка задается через движение жесткого инструмента со скоростями  $v_i^*$ , то мощность воздействий на поверхности  $S_v$

$$N_{\text{п}} = \iint_{S_v} p_i v_i^* ds.$$

В теории пластичности доказывается, что если в каждой точке объема деформируемого тела  $V$  в данный момент времени известны компоненты тензоров напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$ , то работа внутренних сил (пластических деформаций)

$$A_{\text{в}} = \iiint_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV = \iiint_V T \Gamma dV. \quad (2.32)$$

Мощность пластических деформаций характеризует работу в единицу времени:  $N_{\text{в}} = dA_{\text{в}}/dt$ , поэтому, дифференцируя (2.32)

по времени, получим выражение для мощности пластических деформаций, учитывая выражения (2.19), (2.23):

$$N_B = \iiint_V \sigma_{ij} \xi_{ij} dV = \iiint_V T \mathbf{n} dV. \quad (2.33)$$

Закон сохранения механической энергии формулируется так: работа приложенных к телу поверхностных сил равна работе пластических деформаций (при отсутствии скольжения на контактной поверхности):

$$\iint_S p_i u_i ds = \iiint_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV.$$

## 2.2. Обрабатываемость давлением металлов и сплавов

Обработке давлением подвергают деформируемые черные и цветные металлы. К черным металлам относят железо и сплавы на его основе с углеродом и легирующими элементами, все остальные металлы и сплавы называют цветными. Черные металлы подразделяют на стали (до 2 % углерода) и чугуны, содержащие более 2 % углерода. Цветные металлы подразделяют на легкие, тяжелые (с плотностью более 8 000 кг/м<sup>3</sup>), редкие и благородные. К тяжелым металлам относятся свинец, цинк, никель, кадмий, кобальт, олово и др. К благородным относят золото, серебро, платину и их сплавы, которые, благодаря высокой пластичности и химической стойкости, находят широкое применение в технике и ювелирном деле.

Используются следующие стали:

— углеродистые (Ст 0...Ст 6, 10, 20, 45, 60, 70, У7...У13, А 20 и др.);

— легированные (40Х, 30ХГСА, 38ХС, 12Х1МФ, 38Х2МЮА, ШХ 15 и др.);

— высоколегированные коррозионно-стойкие (нержавеющие), легированные хромом и никелем (08X18H10T, 12X18H10T, 03X12H10MT, 07X16H6, 03X18H12BM, X15H5D2TЮ и др.);

— жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы, сохраняющие эксплуатационные свойства при температурах более 600 °С (12X21H5T, 15X20H12T и др.).

Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—94), например Ст0, Ст3кп, Ст6сп, где последние буквы обозначают степень раскисленности стали: кп — кипящие, сп — спокойные, пс — полуспокойные. Углеродистые качественные конструкционные стали (ГОСТ 1050—88) отличаются меньшим содержанием вредных примесей серы и фосфора ( $S, P \leq 0,035 \dots 0,040 \%$ ) и обозначаются 08 кп, 10 пс, 10...60 и др. Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435—99) обозначаются У7...У13, где цифра — массовая доля углерода (У7 — 0,7 %; У13 — 1,3 %). Углеродистые автоматные сернистые стали А11...А35 (ГОСТ 1414—75) относятся к сталям специального назначения для последующей обработки резанием на токарных станках и автоматах. К углеродистым сталям специального назначения относятся также судовые свариваемые стали марок А, В, Д, Е (в виде проката по ГОСТ 5521—93), котельные стали 15К...22К (в виде листового проката по ГОСТ 5520—79), мостовые стали 16Д (прокат по ГОСТ 6713—91). Цифра в обозначении углеродистых сталей обозначает в большинстве случаев массовую долю углерода в сотых долях процента.

Содержание углерода влияет на свойства стали: с увеличением содержания углерода возрастает прочность (временное сопротивление  $\sigma_b$ ) и твердость, но уменьшается пластичность стали. Однако прочность повышается только примерно до 1 % С, а при более высоком содержании углерода она начинает уменьшаться в связи с образованием вторичного цементита по границам зерен в заэфектоидных сталях ( $> 0,8 \%$  С).

Легированные стали подразделяются на низколегированные (содержание легирующих элементов до 2,5 %), среднелегированные (2,5...10 %) и высоколегированные (более 10 %).



Легирующие элементы в маркировке сталей по российским стандартам обозначаются следующими буквами:

М — молибден	Х — хром
А — азот	Ф — ванадий
Д — медь	В — вольфрам
Н — никель	П — фосфор
Ю — алюминий	Г — марганец
Б — ниобий	К — кобальт
Т — титан	Ц — цирконий
Р — бор	С — кремний

Легирующие элементы придают сталям определенные свойства.

**А з о т (N)** применяется в сталях в качестве заменителя углерода и никеля. Он значительно повышает коррозионную стойкость стали.

**В а н а д и й (V)** улучшает такие свойства стали, как твердость и прочность, а также значительно повышает ее износостойкость. Ванадий присутствует в инструментальных и быстрорежущих сталях.

**В о л ь ф р а м (W)** является металлом с самой высокой температурой плавления. Он используется во многих отраслях. Вольфрам наравне с молибденом является обязательным элементом для быстрорежущих сталей. Помимо устойчивости к высокой температуре, наличие вольфрама в стали улучшает такие свойства, как износостойкость и твердость.

**К о б а л ь т (Co)** в небольшом количестве присутствует в твердых сплавах и быстрорежущих сталях, увеличивая твердость и прочность стали.

**К р е м н и й (Si)** не является карбидообразующим элементом, и его количество в стали ограничивают до 2 %. Он значительно повышает предел текучести стали и при содержании более 1 % снижает вязкость и повышает порог хладноломкости.

**М а р г а н е ц (Mn)** увеличивает твердость и устойчивость стали к износу. Однако его содержание в больших количествах (более 1,5 %) повышает хрупкость.

**М о л и б д е н (Mo)** повышает красностойкость, упругость, временное сопротивление, антикоррозионные свойства и сопротив-

ление окислению при высоких температурах. Также он делает состав стали более равномерным. Молибден является обязательным элементом в быстрорежущих сталях.

**Н и к е л ь (Ni)** повышает коррозионную стойкость стали. Кроме того, он незначительно повышает прочность.

**Н и о б и й (Nb)** является достаточно редкой легирующей добавкой и повышает износостойкость и коррозионную стойкость стали.

**Т и т а н (Ti)** обычно добавляют в сталь для повышения прочности, стойкости к коррозии и температурам. Также он способствует измельчению зерна и улучшает обрабатываемость.

**Х р о м (Cr)** оказывает благоприятное влияние на механические свойства конструкционной стали в количестве до 2 %; он растворяется в феррите и цементите, увеличивает стойкость стали к коррозии и износу. Сталь считается нержавеющей, если содержание хрома в ней больше или равно 14 %.

В ОМД наиболее часто применяются следующие цветные металлы и сплавы:

- алюминиевые (Д1, АД-1, АМц, АМг6 и др.);
  - медные (техническая медь М0, М1 и др.), легированные оловом и др. элементами (бронзы Бр.А7, Бр.АЖМн10-3-1,5 и др.) и легированные цинком (латуни Л96, Л68, Л63 и др.);
  - титановые (ВТ1-0, ОТ4-0, ВТ 5 и др.);
  - магниевые (МА2, МА8, МВ65-1 и др.);
  - прочие сплавы на основе циркония, молибдена, хрома и др.
- Эти сплавы обладают уникальными свойствами (хром и молибден придают жаропрочность, цирконий — радиационную стойкость).

Алюминиевые сплавы получили распространение благодаря легкости (плотность порядка  $2700 \text{ кг/м}^3$ ), высокой пластичности (относительное удлинение  $\delta = 40 \dots 45 \%$ ) и высокой коррозионной стойкости благодаря оксидной пленке. Легирующие элементы придают алюминиевым сплавам высокую прочность (медь, магний, марганец) и жаропрочность (никель, железо). Например, такие сплавы, как АМг6 (примерно 6 % магния), дюралюминий Д16 (около 4 % меди, 1 % кремния, до 1 % марганца и магния), широко применяют в самолетостроении для обшивки фюзеляжей.

Медные сплавы относятся к тяжелым металлам (плотность порядка 8500—8900 кг/м<sup>3</sup>), имеют высокую электропроводность, пластичность, коррозионную стойкость. Применяется техническая медь марок М0 (содержание меди не менее 99,95 %), М1 (не менее 99,9 %), М4 (99,0 %) и др. Самыми распространенными медными сплавами являются латуни, содержащие до 50 % цинка. Хорошо обрабатываются давлением латуни марок Л63...96 (цифра означает среднее содержание меди), специальные латуни (алюминиевые ЛА85-0,5, ЛА77-2; свинцовистые ЛС59-1, ЛС63-3 и др.). Основными легирующими элементами бронз являются олово, алюминий, марганец, кремний, бериллий, железо (например, оловянистая бронза Бр.ОФ6,5-0,15: олова 6,5 %, фосфора 0,15 %). В настоящее время применяют в основном безоловянистые (специальные) бронзы, которые по своим свойствам превосходят оловянистые бронзы. Это сплавы с алюминием (Бр. А7), с алюминием, железом и марганцем (Бр. АЖМн10-3-1,5), бериллиевая бронза (Бр. Б2) и др.

Широкое применение в авиационной и космической технике нашли титановые сплавы благодаря малой плотности (4500 кг/м<sup>3</sup>), коррозионной стойкости и прочности. Например, ВТ1 (99,3 % титана), ВТ3-1 (5 % алюминия, 2,5 % хрома, 1,9 % молибдена), ВТ14 (4 % алюминия, 3 % молибдена).

Еще более легкими конструкционными материалами являются сплавы магния (плотность 1800 кг/м<sup>3</sup>). В качестве легирующих добавок применяют алюминий, цинк, марганец. Ниже в табл. 2.1 приведены свойства деформируемых высокопрочных сплавов МА2 и МА8, легированных марганцем, и сверхлегкого сплава МА18, легированного литием.

Обрабатываемость давлением может быть оценена механическими свойствами металла при комнатной температуре (временным сопротивлением  $\sigma_v$ , пределом текучести  $\sigma_T$ , относительным удлинением  $\delta$  и сужением  $\psi$ ). В теории ОМД обрабатываемость оценивают пластичностью и сопротивлением деформации металла (см. подразделы 2.1.3 и 2.1.5). Пластичность может быть выражена через относительное удлинение или сужение, а сопротивление деформации — это напряжение, значение которого находится между пределом текучести и временным сопротивлением (см. рис. 2.5),

т. е. временное сопротивление оценивает максимально возможное значение сопротивления деформации.

В табл. 2.1 приведены значения механических свойств некоторых сплавов, а также оценка обрабатываемости давлением.

Т а б л и ц а 2.1

*Оценка обрабатываемости давлением\**

Марка стали (сплава)	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	δ, %	ψ, %	Обрабатываемость давлением (шкала оценок)**	
					Балл	Кач. оц.
Стали						
08	200	330	33	60	84	вв
10	210	340	31	55	78	вв
20	250	420	25	55	71	в
45	360	610	16	40	48	у
60	410	690	12	35	40	н
15Х	500	700	12	45	49	у
45Х	850	1050	9	45	44	у
45Г2	410	700	11	40	43	н
38ХС	700	900	13	50	53	у
30ХМ	750	950	11	45	46	у
15ХФ	550	750	13	50	54	у
20ХН	600	800	14	50	55	у
50ХН	900	1100	9	40	39	н
30ХГС	850	1100	10	45	44	у
ШХ 15	420	730	21	46	56	у
Х18Н10Т	200	550	40	55	73	в
Алюминиевые сплавы						
АД1	30	80	35	80	96	вв
АМц	50	130	23	70	87	вв

О к о н ч а н и е   т а б л . 2.1

Марка стали (сплава)	Предел текулости, МПа	Временное сопротивление, МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Обрабатываемость давлением (шкала оценок)**	
					Балл	Кач. оц.
АМг3	90	190	15	65	80	вв
АД31	50	90	25	30	51	у
Д1	250	410	15	30	40	у

*Медные сплавы*

Л68	91	320	55	70	89	вв
ЛО60-1	150	380	40	46	70	в
ЛЖМц59-1-1	170	450	50	55	83	в
ЛС60-1	130	370	45	30	63	в
Бр. ОФ4-0,25	—	340	52		83	в
Бр. ОЦ4-3	250	350	40	—	65	в
Бр. ОФ10-1	200	350	10	10	22	н

*Титановые сплавы*

ОТ4	600	800	20	52	61	у
ВТ4	750	850	22	30	44	н
ВТ6	850	950	13	45	48	в

*Магниевые сплавы*

МА2	170	270	10	27	34	н
МА8	170	270	10	28	35	н
МА18	155	185	30	60	88	вв

\* Составлено по: Краткий справочник металлста / под ред. А. Н. Маслова. М. : Машиностроение, 1971. 767 с.; Физическое металловедение: учеб. для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов, В. П. Швейкин. Екатеринбург : Изд-во УГТУ—УПИ, 2001. 534 с.

\*\* Шкала оценок: 80—100 — весьма высокая обрабатываемость (вв); 60—80 — высокая (в); 40—60 — удовлетворительная (у); 20—40 — низкая (н); менее 20 — не обрабатывается ОМД.

Количественную оценку обрабатываемости можно дать следующим образом. Представим обрабатываемость в 100-балльной шкале как произведение трех коэффициентов:

$$Q = 100 K_1 K_2 K_3,$$

где  $K_1 = \frac{\delta + \psi}{(\delta + \psi)_s} = \frac{\delta + \psi}{100}$  — коэффициент, учитывающий пластичность металла;  $(\delta + \psi)_s$  — эталонная пластичность, принятая за 100 %, что примерно соответствует очень пластичным сплавам (например, для стали 08 — 93 %, для латуни Л68 — 125 %, для алюминиевого сплава АД1 — 115 %);

$$K_2 = \frac{1 - 0,1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T}}{1 - 0,1 \left( \frac{\sigma_B}{\sigma_T} \right)_s} = \frac{1 - 0,1 \frac{\sigma_B}{\sigma_T}}{0,9} \text{ — коэффициент, учитывающий ин-}$$

тенсивность упрочнения металла, чем больше отношение  $\sigma_B / \sigma_T$ , тем хуже обрабатываемость металла, эталонное значение  $(\sigma_B / \sigma_T)_s = 1$ ;

$$K_3 = \frac{1 - 0,0001 (\sigma_B + \sigma_T)}{1 - 0,0001 (\sigma_B + \sigma_T)_s} = \frac{1 - 0,0001 (\sigma_B + \sigma_T)}{0,985} \text{ — коэффициент, оце-}$$

нивающий энергоемкость деформирования по сумме  $\sigma_B + \sigma_T$ , от чего зависит усилие деформации. За эталонное значение этой суммы  $(\sigma_B + \sigma_T)_s = 150$  МПа принято примерное среднее значение для легкодеформируемых сплавов. Например, для сплава АД1 эта сумма равна 110 МПа, для АД31 — 140 МПа, для АМц — 180 МПа.

Технологические свойства металлов при ОМД оцениваются пластичностью и сопротивлением деформации, определение которых приведено выше. В теории ОМД пластичность оценивается инвариантной (не зависящей от системы координат) характеристикой — предельной степенью деформации сдвига  $\Lambda_p$ , которую может выдержать металл до разрушения. Однако в производственных условиях и в теории механических свойств пластичность

оценивают относительным (%) удлинением  $\delta$  или сужением  $\psi$ . Установив связь между этими характеристиками.

Степень деформации сдвига при монотонном растяжении цилиндрического образца рассчитывается по формуле

$$\Lambda = \sqrt{3} \ln \frac{F_0}{F} = \sqrt{3} \ln \frac{L}{L_0}, \quad (2.34)$$

где  $F_0, L_0$  и  $F, L$  — соответственно площади поперечного сечения и длины образца до деформации и текущие<sup>2</sup>.

В момент разрушения  $F = F_p, L = L_p$  и, учитывая, что  $\psi = \frac{F_0 - F_p}{F_0} 100 \%$ ,  $\delta = \frac{L_p - L_0}{L_0} 100 \%$ , а  $\frac{F_0}{F_p} = \frac{100}{100 - \psi}$  и  $\frac{L_p}{L_0} = \frac{100 + \delta}{100}$ , получим из (2.34):

$$\Lambda_p = \sqrt{3} k_\psi \ln \frac{100}{100 - \psi}, \quad (2.35)$$

$$\Lambda_p = \sqrt{3} k_\delta \ln \frac{100 + \delta}{100}, \quad (2.36)$$

где  $k_\psi, k_\delta$  — коэффициенты немонотонности деформации при образовании шейки соответственно в поперечном и продольном направлениях.

Наши расчеты с использованием диаграмм пластичности<sup>3</sup> показали, что для большинства сталей можно принять  $k_\psi = 1,1 \dots 1,3$ ;  $k_\delta = 3,0 \dots 3,3$ . Заметим, что формулы (2.35) и (2.36) пригодны для оценки пластичности при показателе напряженного состояния  $\sigma/T = 0,58$ , что соответствует одноосному растяжению.

В производственных условиях деформацию заготовки при ОМД оценивают чаще всего коэффициентом вытяжки  $\mu = \frac{F_0}{F} = \frac{L}{L_0}$ , че-

<sup>2</sup> Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. М.: Металлургия, 1970. 229 с.

<sup>3</sup> См.: Там же. С. 48, 50.

рез который можно выразить степень деформации сдвига при удлинении цилиндрической заготовки, используя формулу (2.34)

$$\Lambda = \sqrt{3} k_{\text{нем}} \ln \mu, \quad (2.37)$$

где  $k_{\text{нем}}$  — коэффициент немонотонности деформации в зависимости от способа ОМД (максимальный при прессовании, минимальный при волочении и средний при прокатке).

Предельной степени деформации (2.37) соответствует формула

$$\Lambda_p = \sqrt{3} k_{\text{нем}} \ln \mu_p, \quad (2.38)$$

из которой предельный коэффициент вытяжки, который выдерживает металл до разрушения, может быть определен как:

$$\mu_p = \exp \left( \frac{\Lambda_p}{\sqrt{3} k_{\text{нем}}} \right). \quad (2.39)$$

Формулу (2.39) можно использовать для определения предельных коэффициентов вытяжки с использованием исследований пластичности металлов и диаграмм пластичности. Так, предположив, что в процессах ОМД имеются опасные зоны растягивающих напряжений с  $\sigma/T = 0,58$ , определив пластичность металла по формулам (2.35) и (2.36), можно рассчитать предельные коэффициенты вытяжки за один проход.

## 2.3. Качество продукции ОМД

В нормативной документации (ГОСТы, зарубежные стандарты, технические условия и т. п.) содержатся технические требования к готовым трубам, которые определяют их качество. Перечень некоторых нормативных документов на продукцию ОМД приведен ниже.



**Прокат:**

ГОСТ 1435—99	Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия
ГОСТ 5950—2000	Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия
ГОСТ 1050—88	Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия
ГОСТ 1414—75	Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием. Технические условия
ГОСТ 5520—79	Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия
ГОСТ 5521—93	Прокат стальной для судостроения. Технические условия
ГОСТ 6713—91	Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения. Технические условия
ГОСТ 103—76	Полоса горячекатаная. Сортамент
ГОСТ 535—2005	Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия
ГОСТ 2284—79	Лента холоднокатаная из углеродистой конструкционной стали. Технические условия
ГОСТ 2690—88	Прокат стальной горячекатаный круглый. Сортамент
ГОСТ 2591—88	Прокат стальной горячекатаный квадратный. Сортамент
ГОСТ 2771—81	Проволока круглая холоднотянутая. Сортамент

ГОСТ 8239—89	Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент
ГОСТ 8240—97	Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент
ГОСТ 19903—74	Прокат листовой горячекатаный. Сортамент
ГОСТ 19904—74	Прокат листовой холоднокатаный. Сортамент
ГОСТ 30136—95 (ИСО 8457-1-89)	Катанка из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия

П о к о в к и, ш т а м п о в к и:

ГОСТ 7062—90	Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые ковкой на прессах. Припуски и допуски
ГОСТ 7829—70	Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые ковкой на молотах. Припуски и допуски
ГОСТ 7505—89	Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски
ГОСТ 1133—71	Сталь кованая круглая и квадратная. Сортамент
ГОСТ 8479—70	Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия

Т р у б ы:

ГОСТ 494—90	Трубы латунные. Технические условия
ГОСТ 550—75	Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности
ГОСТ 617—90	Трубы медные. Технические условия
ГОСТ 9567—75	Трубы стальные прецизионные из сталей марок 10, 20, 35, 45, 30ХГСА
ГОСТ 14162—79	Трубки стальные малых размеров капиллярные
ГОСТ 22897—86	Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплавов на основе титана

ГОСТ 10704—91	Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент
ГОСТ 10705—80	Трубы стальные электросварные. Технические условия
ASTM A 213/A 213M-95	Бесшовные ферритные и аустенитные легированные котельные, пароперегревательные и теплообменные трубы
ASTM A 312/A 312M-95	Бесшовные и сварные трубы из аустенитных нержавеющей марок стали
DIN 17459—92	Трубы круглые из жаропрочных аустенитных марок стали
DIN EN 10305	Трубы стальные прецизионные
DIN 17175; 2448	Трубы котельные из жаропрочной стали

В соответствии с ГОСТ 15467—79 качество продукции — это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности, соответствующие ее назначению. При разработке технологии ОМД необходимо учитывать технические требования, чтобы изготовить продукцию требуемого качества.

Качество продукции оценивается совокупностью показателей качества или технических требований. Эти показатели подразделяют на три группы:

- 1) характеризующие точность изделий, т. е. степень соответствия формы и размеров требуемым значениям;
- 2) физико-химические свойства;
- 3) качество поверхности.

Рассматривая технологический процесс как систему, состоящую из технологических операций, можно дать оценку надежности технологического процесса по показателям качества, как показано в подразделе 1.2.

Первая группа показателей характеризует предельные отклонения номинальных размеров поперечного сечения и длины  $P \pm \delta_p$ , где предельное отклонение  $\delta_p$  может быть выражено в миллиметрах или процентах. Допуски (предельные отклонения) могут быть

односторонними (минусовые или плюсовые). Также ограничивается возможная кривизна длинномерных изделий и искажения формы поперечного сечения (перегибы, перекосы и т. п.) и изделия в целом. По точности изготовления продукция обычно делится на категории нормальной, повышенной и высокой точности.

Вторая группа — это показатели физико-химических свойств. Здесь регламентируются следующие характеристики: химический состав стали или сплава; механические свойства (относительное удлинение  $\delta$ , относительное сужение  $\psi$ , предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление  $\sigma_B$ , твердость, удельная вязкость и некоторые другие). Механические свойства изделий обычно должны быть не меньше установленных нормативным документом. Для некоторых видов изделий регламентируется микроструктура, для чего предусматривается отрезка образцов для изготовления микрошлифов. Для изделий, работающих в агрессивных средах, проверяется склонность к межкристаллитной коррозии. Иногда предъявляются также требования к глубине обезуглероженного слоя.

Третья группа технических требований регламентирует качество поверхности. Различают изделия с обычным и повышенным качеством поверхности (например, электрополированные трубы). Обычное качество поверхности чаще описывается словесно: на наружной поверхности не должно быть трещин, закатов, рванин и т. п. Допускаются дефекты механического происхождения (вмятины, риски и др.), не выводящие размеры за пределы допускаемых отклонений. Количественно качество поверхности оценивают классами шероховатости  $R_a$  (по среднеарифметическому отклонению микронеровностей от средней линии) и  $R_z$  (по средней высоте микронеровностей) в мкм по ГОСТ 2789—73. Так, по германскому стандарту DIN EN 10305—2 (2003 г.) на стальные прецизионные холоднотянутые трубы требуется, чтобы трубы имели гладкую наружную и внутреннюю поверхность с шероховатостью  $R_a \leq 4$  мкм.

Рассмотрим перечисленные группы технических требований на примере ГОСТа 8240—97 «Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент». Выпишем требования к швеллеру 20П (высота

200 мм, с параллельными гранями полок) из стали СтЗсп (рис. 2.9). Его номинальные размеры:  $h = 200$  мм,  $b = 76$  мм, толщина полки  $t = 9$  мм, толщина стенки  $s = 5,2$  мм.

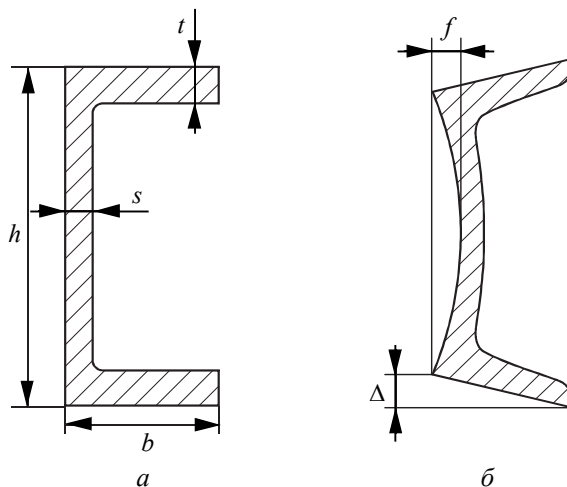


Рис. 2.9. Параметры швеллера:

$a$  — геометрические размеры;  $b$  — параметры искажения формы

Требования по точности. Предельные отклонения на размеры:  $h \pm 2$  мм,  $b \pm 2$  мм,  $t$  — 0,5 мм,  $s \pm 0,6$  мм, на длину до +40 мм (2—8 м) и менее 100 мм (более 8 м). Искажения формы поперечного сечения регламентируются допускаемым перегибом стенки  $f \leq 1$  мм и допускаемым перекосом полки  $\Delta \leq 1$  мм. Допускаемая кривизна в горизонтальной и вертикальной плоскостях — не более 0,2 % длины.

Требования к физико-химическим свойствам изложены в ГОСТ 535—2005 «Прокат сортовой и фасонный из углеродистой стали обыкновенного качества. Общие технические условия». Химический состав стали СтЗсп — по ГОСТ 380—2005. Механические свойства должны быть не хуже следующих значений: временное сопротивление  $\sigma_b = 380—490$  МПа; предел текучести  $\sigma_t = 255$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 26$  %, ударная вязкость  $KCU = 1,08$  Дж/мм<sup>2</sup>.

Требования к качеству поверхности сформулированы словесно: на поверхности проката допускаются без зачистки отдельные раскатанные пузыри и загрязнения, рябизна, отпечатки, риски, не выводящие размеры профиля за пределы минусового отклонения.

Требуемое качество продукции достигается путем контроля технологического процесса на всех стадиях. Технический контроль на металлургическом предприятии включает плавочный контроль, контроль технологического процесса (соблюдения технологической дисциплины) и окончательного контроля.

Плавочный контроль осуществляют с целью проверки соответствия среднего химического состава сплава требуемому на стадии выплавки слитка или НЛЗ. Дальнейший плавочный контроль может включать оценку качества плавки по макро- и микроструктуре и продольному излому. Объем испытаний при плавочном контроле определяется требованиями ГОСТов и ТУ.

Технологический контроль проверяет соблюдение технологической дисциплины (см. подраздел 1.1) с целью предотвращения брака и поломки оборудования в процессе производства. По ходу технологического процесса контролируют следующие основные параметры: температуру нагрева слитков и заготовок, температурный интервал ОМД, режим деформации по этапам и проходам, настройку оборудования и инструмента, нагрузки на оборудование, размеры получаемых заготовок и другие показатели их качества.

Окончательному контролю подвергается готовая продукция с целью проверки соответствия полученных показателей качества, перечисленных выше, требованиям нормативных документов. При отрицательных результатах контроля продукция бракуется.

Контролирующие функции выполняют службы технического контроля (ОТК), заводские лаборатории, метрологические и технологические службы предприятия.

## 2.4. Виды ОМД. Этапы технологических процессов

Способ ОМД заключается в изменении формы и размеров тела (заготовки) путем пластической деформации. Понятие пластической деформации и ее виды рассмотрены в подразделе 2.1.2.

В зависимости от применяемого инструмента и машин, с помощью которых передается усилие деформирования, различают следующие основные традиционные виды ОМД (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2.2

*Классификация процессов ОМД*

Вид ОМД	Инструмент	Машины
Прокатка	Валки, оправки	Прокатные станы
Ковка	Бойки, плиты, прошивни, оправки	Молоты, прессы, ротационные машины
Штамповка	Штампы	
Волочение	Волоки (волочильные кольца), оправки	Волочильные станы
Прессование	Контейнеры, матрицы, пресс-штемпели, пресс-шайбы, иглы (оправки)	Прессы

В табл. 2.2 перечислен основной технологический инструмент, используемый непосредственно для деформации металла. Применяется также вспомогательный для ОМД инструмент: для разделения на части (топоры, пилы, ножницы и др.), для поддержания заготовки во время деформации (проводки, линейки, клещи, манипуляторы) и т. п.

Технологический процесс изготовления изделий ОМД включает обычно следующие этапы:

- нагрев исходной заготовки;
- подготовка заготовки (слиток или НЛЗ) к ОМД (разделение на части, механическая обработка поверхности);

- ОМД 1 (возможно несколько проходов);
- сопутствующие операции (термообработка или нагрев, подогрев, химическая обработка, разделение на части, подготовка концов, транспортировка и др.);
- ОМД 2;
- сопутствующие операции;
- ОМД 3;
- ....;
- операции отделки и контроля качества изделий.

Некоторые способы ОМД выполняются без подогрева заготовки (холодная деформация). Примерами таких процессов могут служить холодная прокатка листов и труб, холодное прессование, волочение, холодная штамповка и некоторые другие. Холодная ОМД обычно производится на заключительном этапе и нацелена на получение изделий высокой точности и качества поверхности, поэтому большое внимание уделяется качеству применяемых смазок и обработке рабочих поверхностей инструмента. Условиями выполнения холодной ОМД являются достаточная пластичность металла в холодном состоянии (табл. 2.1) и достаточная мощность и жесткость машин для ОМД. Одной из особенностей процесса ОМД в холодном состоянии является разогрев металла в процессе ОМД, который может достигать 200—300 °С.

При горячей ОМД учитывается тепловое расширение тел. «Горячий» размер изделия  $D_r$  определяется по формуле

$$D_r = (1 + \alpha \cdot T) D_x, \quad (2.40)$$

где  $\alpha$  — коэффициент линейного теплового расширения;  $T$  — температура конца прокатки;  $D_x$  — размер изделия после охлаждения.

Например, для большинства сталей  $\alpha = 11 \dots 13 \cdot 10^{-6}$  мм/град; для нержавеющей сталей — до  $17 \cdot 10^{-6}$  мм/град; для алюминиевых и магниевых сплавов —  $20 \dots 28 \cdot 10^{-6}$  мм/град; для титановых —  $8 \dots 9 \cdot 10^{-6}$  мм/град; для медных —  $17 \dots 20 \cdot 10^{-6}$  мм/град<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> См.: Краткий справочник металлста / под ред. А. Н. Маслова. М. : Машиностроение, 1971. 767 с.



Реально линейное расширение составляет около 1 %, что учитывается при разработке режимов деформации и конструировании инструмента.

Технологические процессы ОМД могут выполняться на одном участке цеха, в одном цехе, в нескольких цехах одного завода и даже на нескольких заводах. В последнем случае на завод может поступать полупродукт, выпущенный на другом предприятии и используемый на данном заводе для выпуска готовой продукции. В настоящее время часто предприятия (заводы), выпускающие какой-то продукт, объединены в холдинги или металлургические компании (например, Трубная металлургическая компания).

Рассмотрим классификацию перечисленных в табл. 2.2 машин для ОМД. Классификация приведена без подробностей и комментариев, так как углубленно эти вопросы рассматриваются дисциплиной «Оборудование цехов ОМД».

Самые распространенные машины для ОМД — **прокатные станы**. Их классифицируют по следующим признакам:

- по разновидности прокатки (продольная, винтовая, поперечная, планетарная и др.);
- по числу валков в клетях: 2-валковые (дуо), 3(трио)-, 4(кварто)-, многовалковые (до 20 в планетарных станах);
- по направлению вращения валков (реверсивные, нереверсивные);
- по расположению и количеству рабочих клетей:
  - одноклетевые;
  - линейные (многоклетевые, состоящие из нескольких линий, имеющих отдельный привод);
  - последовательные (многоклетевые с увеличенным расстоянием между клетями, чтоб прокатка велась в одной клетке);
  - непрерывные (прокатка ведется одновременно в нескольких клетях);
  - полунепрерывные, состоящие из двух групп клетей (реверсивных и непрерывных);
- по назначению:
  - горячей прокатки: обжимные, заготовочные, рельсо-балочные, крупно-, средне- и мелкосортные, толстолистовые, тонколисто-

вые, среднелистовые, штрипсовые, трубные (непрерывные, автоматические, пилигримовые, речные) и др.;

— холодной прокатки: листовые и трубные (валковые, роликовые и валково-роликовые);

— специального назначения (колесопрокатные, прокатки шаров, полос переменного сечения и др.).

В типоразмере сортовых станов указывается диаметр вала в миллиметрах (например, стан 700), листовых станов — ширина вала (стан 2500), трубных станов — максимальный диаметр прокатываемой трубы (стан холодной прокатки труб ХПТ-55).

Оборудование для кузнечно-штамповочного производства подразделяется на следующие виды:

- прессы (кривошипные, кулачковые, гидравлические, винтовые);
- молоты (паровоздушные, гидравлические, пневматические);
- ротационные машины (например, радиально-ковочные);
- импульсные машины (используется энергия взрыва).

Типоразмер прессы указывает максимальное развиваемое усилие (например, пресс 100000 кН), а типоразмер молота — массу его падающих частей (например, молот 200 кН).

Для прессования используют в основном горизонтальные и вертикальные гидравлические прессы.

Волоочильные станы бывают следующих типов:

- линейные (для получения изделий конечной длины до 12—15 м);
- бухтовые (для получения проволоки и труб, сворачиваемых в бухту);
- однопниточные и многопниточные (чаще до 3 ниток одновременно);
- для волочения сплошных и полых профилей (труб) без оправки и с оправкой (короткой, длинной и самоустанавливающейся).

Типоразмер линейного волочильного стана указывает максимальное усилие (например, 300 кН), а бухтового стана — диаметр рабочего барабана для сворачивания готовой продукции (например, 1000 мм).

## 2.5. Исходная заготовка для ОМД

В качестве исходной заготовки применяются слитки и непрерывнолитая заготовка (НЛЗ). Последняя применяется все чаще, вытесняя слитки, так как позволяет существенно повысить качество металла и производительность.

Слитки применяются на первых этапах прокатки,ковки и прессования. ГОСТов на слитки нет, на каждом заводе есть свои технические условия (ТУ), где указывается химсостав стали или сплава, форма и размеры, состояние поверхности (отсутствие дефектов больше допустимых).

Слитки характеризуют следующими основными параметрами: формой поперечного сечения, массой, отношением высоты (длины) к среднему поперечному размеру (диаметру или ширине)  $L_0/d_{cp} = 2L_0/(d_1 + d_2)$ ; конусностью тела слитка на одну сторону  $(d_1 - d_2)/2L_0 \cdot 100\%$  (рис. 2.10).

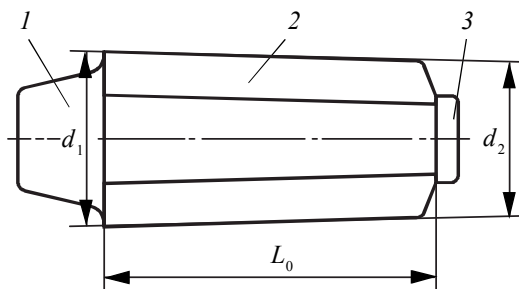


Рис. 2.10. Слиток:

1 — прибыльная часть; 2 — тело слитка; 3 — донная часть

Форма поперечного сечения слитков определяется видом ОМД: для прокатки в цилиндрических валках обжимных станков используют прямоугольные слитки; дляковки в вырезных бойках — многогранные, близкие к круглым; для прессования — чаще круглые или близкие к круглым по форме контейнера, для прессования панелей применяют плоские прямоугольные слитки.

**Прокатные слитки.** Наиболее распространенная форма поперечного сечения — квадрат и прямоугольник. Для прокатки высоколегированных сталей применяют слитки круглого сечения, чтобы уменьшить вероятность поверхностных дефектов. Для прокатки колес и бандажей используют 8- и 12-гранные слитки.

Слитки кипящей стали (не полностью раскисленной, в основном низкоуглеродистой) отливают в уширенные книзу изложницы. Для таких слитков характерны отсутствие концентрированной усадочной раковины, более высокие пластичность и неоднородность химического состава.

Слитки спокойной стали (легированной) отливают уширенными вверх (с нормальной конусностью). Такая сталь полностью раскислена с помощью раскислителей: ферросилиция ( $\text{Fe—Si}$ ), ферромарганца ( $\text{Fe—Mn}$ ), алюминия. Такие слитки имеют прибыльную часть 15—20 % (рис. 2.10) для вывода усадочной раковины, которая затем удаляется, увеличивая расход металла.

Масса слитка зависит от химического состава стали: чем крупнее слиток, тем он неоднороднее по химическому составу, поэтому слитки из легированных сталей отливают меньших размеров.

Слитки легированных сталей отливают массой 0,5—1,5 т (при содержании легирующих элементов 8—15 %) и 3—6 т (при меньшем содержании легирующих элементов).

Развес слитков из углеродистых и низколегированных сталей составляет 10—12 т для прокатки блюмов; 25—40 т — для прокатки слябов; 100 т и более — для прокатки толстых листов.

Конусность слитков на сторону рекомендуется 3—4 % для спокойной стали и 1—1,5 % — для слитков из кипящей стали.

Отношение высоты слитка к средней толщине составляет 1,5...3,5 для слитков спокойной стали; 3...3,5 — для слитков кипящей стали.

**Кузнечные слитки.** Применяется многогранная, близкая к круглой, форма поперечного сечения (6, 8, 12 граней, вплоть до 24). Слитки имеют донную и прибыльную части (см. рис. 2.10), которые обрубаются перед ковкой и дают отходы в сумме до 30 %.

Обычно конусность составляет 5 %; для уменьшения осевой рыхлости и усадочной раковины, повышения однородности металла применяются слитки с повышенной конусностью до 12 %.

Масса слитков 1,2—350 т, причем из одного слитка могут быть откованы несколько поковок. Для обеспечения устойчивости при осадке слитка отношение его длины к среднему диаметру не должно превышать 2—2,5.

Удлиненные слитки с отношением длины к среднему диаметру 3—5 применяют при отсутствии осадки, в этом случае отходы на обрезь снижаются до 15 %. Металл удлиненного слитка более качественный, выше однородность химического состава, больше плотность, меньше концентрация пустот и пузырей.

Для изготовления пустотелых деталей могут применяться полые слитки, отливаемые в изложницы со встраиваемым холодильником.

Непрерывнолитая заготовка производится на машинах непрерывного литья (МНЛЗ) и наиболее прогрессивна по сравнению со слитком, так как процесс ведется непрерывно, возможно получение заготовки различной формы поперечного сечения, существенно улучшается структура и однородность металла, появляется возможность установки в линии МНЛЗ прокатных и ковочных агрегатов. Один из серьезных дефектов НЛЗ — осевая пористость, для ее уменьшения регулируют скорость охлаждения и вводят специальные модификаторы.

НЛЗ имеют следующие размеры поперечных сечений: квадрат от 80 до 200 мм — для получения мелко- и среднесортowych профилей; блюмы от 260 × 230 мм до 430 × 760 мм — для крупносортной стали и рельсов; слябы толщиной 40—250 мм и шириной 600—1650 мм — для листов; круг до 490 мм — для железнодорожных колес и бандажей; круг 150—360 мм и квадрат 240—360 мм — для труб.

## 2.6. Нагрев металла и температурный интервал ОМД

Цель нагрева — повышение обрабатываемости металла, т. е. уменьшение сопротивления деформации, усилия деформирования, энергоемкости процесса и повышение пластичности металла. Нагрев должен быть выполнен оптимальным образом с обеспечением нужных свойств по объему изделия без лишних энергозатрат.

Нагрев осуществляется в печах различных конструкций. По режиму нагрева печи подразделяются на камерные (температура рабочего пространства одинакова) и методические (температура изменяется по длине печи). По виду источников тепла различают электрические (в том числе индукционные) и пламенные печи. Используют печи с разным способом перемещения заготовок: толкательные, с шагающим подом, с шагающими балками и с вращающимся подом. Слитки перед прокаткой подогревают в нагревательных колодцах.

Режимы нагрева включают следующие параметры: скорость нагрева, температура нагрева, время выдержки. Рациональные режимы определяются опытным путем с учетом физико-химических свойств сплавов, прежде всего их пластичности и теплопроводности. Например, известно, что теплопроводность легированных сталей ниже, чем углеродистых, и с повышением температуры теплопроводность уменьшается.

Температура нагрева, с одной стороны, должна быть максимальной, чтобы обеспечить повышение пластичности и снижение сопротивления деформации (хотя для некоторых сплавов эта зависимость немонотонная); с другой стороны, не должна быть слишком высокой во избежание сильного окалинообразования и обезуглероживания поверхности. Практически температуру нагрева сталей принимают на 100—200 °С ниже линии солидуса  $JE$  (рис. 2.11, пунктирная кривая  $I$ ).

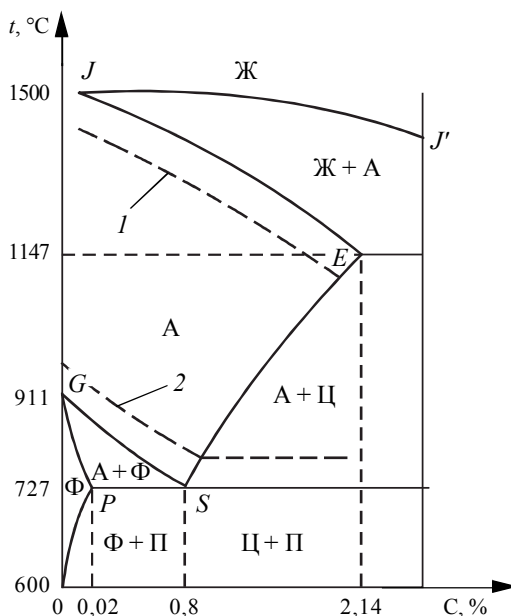


Рис. 2.11. Фрагмент диаграммы железо — углерод:

Ж — жидкая фаза; А — аустенит; Ф — феррит; Ц — цементит; П = Ф + Ц — перлит;

$JJ'$  — линия ликвидуса;  $JE$  — линия солидуса;

$I$  — температура нагрева;  $2$  — температура конца ОМД

Скорость нагрева устанавливают в зависимости от химического состава сплава, а также от размеров заготовки: чем она крупнее, тем медленнее нагрев. Скорость нагрева обычно повышают с течением времени. Например, нагрев стальных заготовок на первом этапе до температур  $600\text{—}800^\circ\text{C}$  ведут медленно со скоростями  $250\text{—}275$  град/ч (для углеродистых сталей с содержанием углерода  $C < 0,3\%$ ),  $125\text{—}150$  град/ч (для углеродистых сталей с содержанием углерода  $C > 0,3\%$ ),  $40\text{—}100$  град/ч (для легированных сталей). Медленный нагрев объясняется низкой пластичностью металла и возможностью образования трещин из-за разности температур наружных и внутренних слоев металла. Чем ниже теплопроводность сплава, тем больше градиент температур и выше веро-

ятность образования трещин. Поэтому скорость нагрева легированных сталей самая низкая. На втором этапе, при температурах выше 800 °С, скорость нагрева увеличивают, повышая температуру печи до заданной температуры или выше на 30—50 °С. При таких температурах пластичность стали увеличивается и заканчиваются структурные превращения.

Нагрев завершается выдержкой при заданной температуре с целью обеспечения равномерного нагрева по объему тела. В процессе выдержки улучшается качество металла, активизируется диффузия, завершаются структурные изменения, происходит выравнивание химического состава и т. п. Например, нагрев стального кузнечного слитка массой 45 т до 1200 °С длится 32 ч, а выдержка — 7 ч.

После нагрева заготовка подвергается ОМД, в процессе которой металл остывает. Важно завершить обработку при определенной температуре, так как это определяет структуру и механические свойства изделий. Если всю обработку в заданном температурном интервале завершить не удастся, применяют промежуточный подогрев заготовки и многопроходную схему деформирования.

Обычно для сталей температура конца ОМД выбирается выше температуры рекристаллизации. Для доэфектоидных сталей (содержание углерода  $C < 0,8 \%$ ) — выше линии  $GS$  (точки  $A_{c3}$ ) (рис. 2.11), т. е. в однофазной области аустенита, для которого характерна равноосная структура. Для заэфектоидных сталей (содержание углерода  $C > 0,8 \%$ ) — ниже линии  $ES$  (см. рис. 2.11), в двухфазной области (аустенит + цементит), так как в однофазной области закончить обработку не удастся из-за узкого температурного интервала. Для определения температурного интервала обработки легированных сталей, имеющих специфические свойства, проводятся специальные исследования.

Ниже для примера приведены допустимые температурные интервалы (°С) ОМД некоторых сталей и сплавов<sup>4</sup>:

---

<sup>4</sup> Мастеров В. А., Берковский В. С. Теория пластической деформации и обработка металлов давлением : учеб. для техникумов. М. : Металлургия, 1989. С. 153.



---

Ст0, Ст3, 10	750—1300
45, 40Х, 35ХГСА	800—1250
08Х18Н10Т	950—1220
ШХ 15, 9ХС	800—1150
Алюминий и сплавы	300—510
Медь и сплавы	750—950
Титановые сплавы	800—820
Никель и сплавы	1250—1320

Нагрев металла сопровождается следующими нежелательными процессами.

**Окалинаобразование** (угар металла), достигающее 4—8 кг/м<sup>2</sup>. Интенсивность угара сильно зависит от температуры и продолжительности нагрева (резко увеличивается после 1200 °С), газовой среды печи (окислительная или в защитной атмосфере), химического состава сплава (определяет состав оксидов, из которых состоит окалина).

**Обезуглероживание** поверхности — уменьшение содержания углерода в поверхностном слое, что снижает твердость стали. Зависит от тех же факторов, что и окалинообразование.

При нарушении режимов нагрева возможны следующие виды брака.

**Перегрев** — следствие превышения длительности выдержки при высокой температуре (выше  $A_{с3}$ ), сопровождающейся ростом зерна, снижением механических свойств, образованием рванин при прокатке и ковке.

**Пережог** образуется в результате нагрева стали до температур, близких к температуре солидуса. При этих температурах межзеренное вещество расплавляется, связь между зернами нарушается, сталь становится красноломкой и разрушается во время прокатки.

### 3. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ

#### 3.1. Классификация и виды продукции

**Прокатка** — это способ деформации заготовки во вращающихся валках, самый распространенный способ ОМД. Прокаткой получают чаще всего длинномерные изделия (сортовой простой и фасонный прокат, катанку, ленту, трубы и др.), а также листы.

Классификация процессов прокатки аналогична классификации прокатных станов (см. подраздел 2.4) и здесь подробно не рассматривается. Отметим лишь основные разновидности прокатки по расположению осей вращения валков относительно оси прокатки: **продольная** прокатка (оси перпендикулярны); **поперечная** (оси параллельны) и **винтовая** (оси расположены под острым углом). Самой распространенной является продольная прокатка, а способ продольной прокатки полосы в двух одинаковых цилиндрических валках известен как простой случай прокатки и подробно рассматривается во всех учебниках по теории прокатки.

Основные схемы прокатки приведены на рис. 3.1. Видно, что существуют две схемы прокатки: традиционная (устаревшая) — из слитка (рис. 3.1, *а*) и современная (рис. 3.1, *б*) — из непрерывнолитой заготовки (НЛЗ).

Традиционный технологический процесс прокатки является достаточно сложным, многопереходным и затратным. При использовании НЛЗ технологическая схема значительно упрощается и обладает следующими преимуществами:

- сокращается целый передел прокатки на обжимных и заготовительных станах;

- ликвидируется парк изложниц и железнодорожных составов для доставки слитков, сокращается расход металла при обрезке донной и прибыльной частей слитка;
- сокращаются площади складов передельного проката, печи для подогрева заготовок и др.;
- значительно улучшается качество заготовок и готового проката.

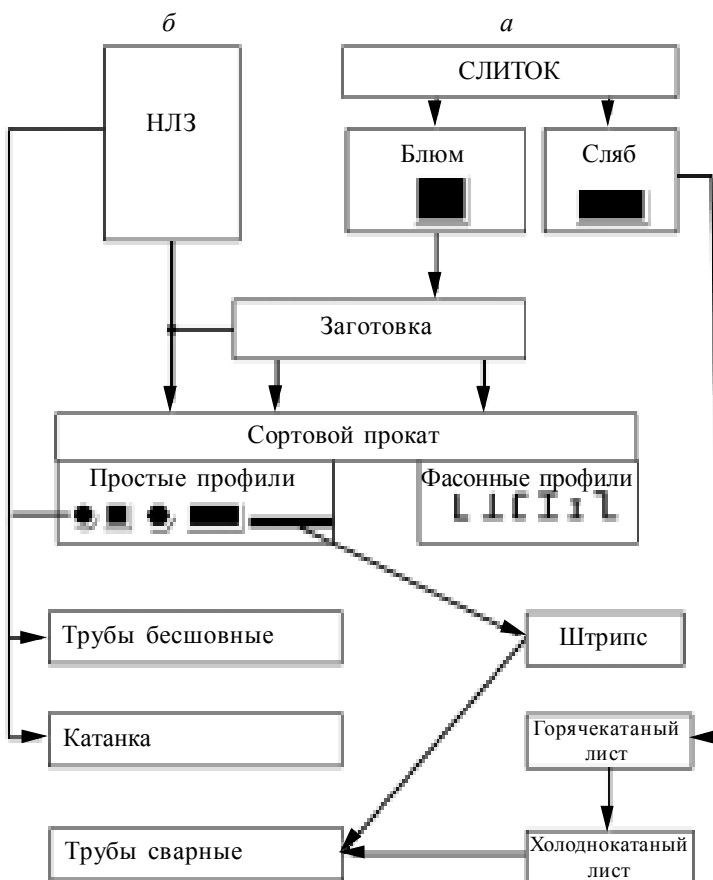


Рис. 3.1. Основные схемы прокатки:

а — традиционная; б — современная

На рис. 3.1 показаны следующие разновидности прокатного полупродукта и готовой продукции.

**Б л ю м** — это полупродукт квадратного или близкого к квадратному сечения размером 140—450 мм.

**С л я б** — это полупродукт прямоугольного сечения для последующей горячей прокатки листов толщиной 100—350 мм, шириной 300—2200 мм, длиной 1 200—11 000 мм. Отношение ширины к толщине может быть до 3—4.

**З а г о т о в к а** — полупродукт квадратного или близкого к нему сечения от 40 до 250 мм, прокатываемый из блюмов.

В современной схеме прокатного производства блюмы, слябы и заготовки могут быть непрерывнолитыми.

Сортовой прокат делится на простые и фасонные профили. Простые профили (круг, квадрат, шестиугольник, прямоугольник, полоса — в порядке расположения слева направо на рис. 3.1) производятся из заготовки и классифицируются по крупности: крупный (80—200 мм), средний (40—80 мм), мелкий (8—40 мм), катанка (проволока диаметром 5,5—8 мм).

**Ф а с о н н ы е п р о ф и л и** (уголок, тавр, швеллер, двутавр, рельс, зетовый — в порядке расположения слева направо на рис. 3.1) прокатывают также из заготовки. Высота профилей — до 500 мм, ширина — до 250 мм.

**Г о р я ч е к а т а н ы й л и с т** получают из слабов шириной 600—5000 мм и разделяют на толстый (толщиной 4—160 мм) и тонкий (2—4 мм).

**Х о л о д н о к а т а н ы й л и с т** выпускают толщиной менее 0,15—2 мм. Разновидностью этой продукции является жесть толщиной до 0,07 мм.

**Ш т р и п с** — это холоднокатаная лента, из которой производятся сварные трубы.

Бесшовные трубы диаметром 25—550 мм получают горячей прокаткой из круглого проката или НЛЗ на трубопрокатных агрегатах, а меньшего диаметра (до 3 мм) — холодной прокаткой и волочением.

Сварные трубы диаметром от 5 до 5 000 мм получают из холоднокатаного листа (большого диаметра) либо штрипса.

## 3.2. Калибровка валков

Продольная прокатка производится с помощью цилиндрических валков с гладкой бочкой (для получения полос и листов) и калиброванных валков (для прокатки простых и фасонных профилей).

Основные элементы и размеры калиброванных валков приведены на рис. 3.2.

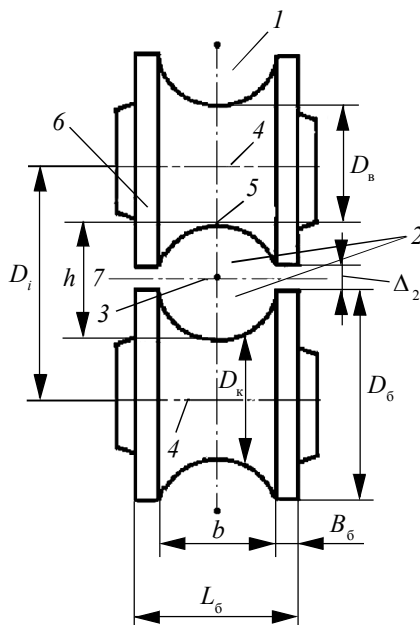


Рис. 3.2. Ручьевые валки:

1 — ручей; 2 — калибр; 3 — центр калибра; 4 — оси вращения валков; 5 — вершина калибра; 6 — реборда (бурт); 7 — линия разъема калибра; 8 — линия центров валков

Вырез, соответствующий форме прокатываемого профиля, называется ручьем. Ручьи валков образуют калибр высотой  $h$  и шириной  $b$ .

$D_i$  — начальный (идеальный) диаметр валка — расстояние между осями вращения валков либо между центрами калибров;

$D_6$  — диаметр валка по ребордам (по бочке):

$$D_6 = D_i - \Delta_2,$$

где  $\Delta_2$  — зазор между реборами валков;

$D_k$  — катающий диаметр валка — диаметр в сечении, где скорости металла и валка совпадают;

$D_b$  — диаметр валка по вершине калибра (минимальный);

$L_6$  — длина (ширина) валка по бочке;

$B_6$  — ширина реборды.

Глубина нарезки ручья оценивается коэффициентом вреза:

$$q = \frac{h}{D_i}.$$

Калибры подразделяются на простые (рис. 3.3, 1—8) и фасонные (рис. 3.3, 9) для прокатки сложных профилей (уголок, тавр, швеллер, двутавр и др.). Также калибры могут быть открытые (линия разъема калибра совпадает с его осью симметрии либо расположена внутри калибра, рис. 3.3, 1—7) и закрытые (линия разъема расположена на верхней или нижней грани, рис. 3.3, 8, 9).

По месту в технологической цепочке калибры делятся на вытяжные, предназначенные для уменьшения площади поперечного сечения прокатываемой полосы, и отделочные — для придания прокатываемой полосе требуемой формы без значительной вытяжки.

Практикой установлены следующие устойчивые системы (пары) вытяжных калибров: ящичные, ромб — квадрат, овал — квадрат, шестиугольник — квадрат, овал — ребровой овал и некоторые другие.

К а л и б р о в к а в а л к о в — это система последовательно расположенных калибров, обеспечивающая в процессе прокатки получение требуемого профиля из заданной заготовки.

Расчет чаще всего осуществляется итерационным методом и требует большого объема трудоемких вычислений, поэтому выполняется на ЭВМ с помощью специально разработанных пакетов прикладных программ и систем автоматизированного проектирования (САПР)<sup>1</sup>.

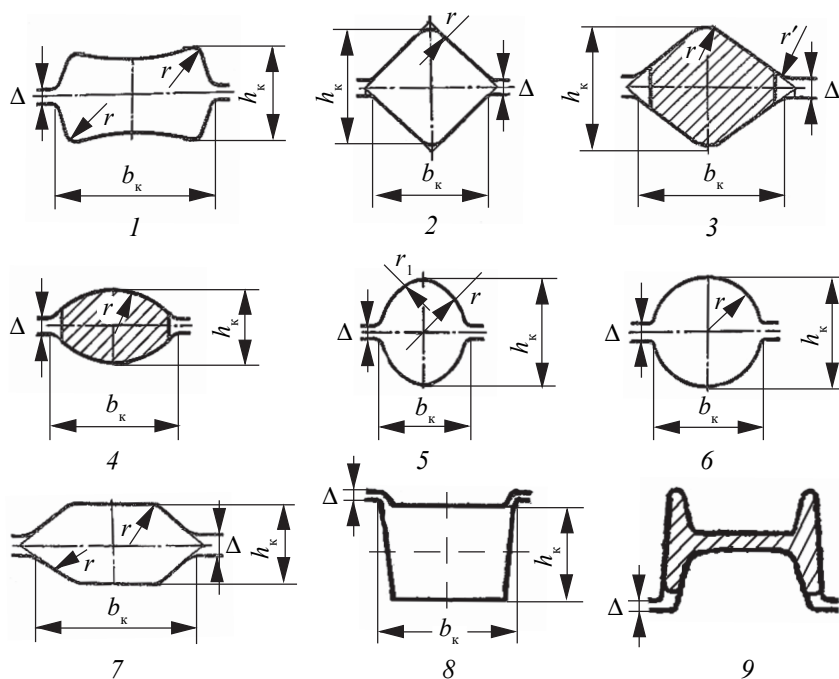


Рис. 3.3. Виды калибров:

1 — ящичный открытый; 2 — квадратный; 3 — ромбический; 4 — овальный; 5 — ребровой овальный; 6 — круглый; 7 — шестиугольный; 8 — ящичный закрытый; 9 — фасонный;  $h_k$  — высота калибра,  $b_k$  — ширина,  $r$  — радиус

<sup>1</sup> См.: Смирнов В. К., Шилов В. А., Инатович Ю. В. Калибровка прокатных валков : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Теплотехника, 2010. 490 с.

Расчет калибровки валков производится в следующей последовательности:

1) рассчитывают коэффициент общей вытяжки  $\mu_{\Sigma} = F_0 / F_{\text{пр}}$ , где  $F_0$  — площадь поперечного сечения исходной заготовки,  $F_{\text{пр}}$  — площадь поперечного сечения прокатываемого профиля;

2) определяют число проходов прокатки  $n = \ln \mu_{\Sigma} / \ln \mu_{\text{пр}}$ , где  $\mu_{\text{пр}} = 1,2 \dots 1,5$  — предельный коэффициент вытяжки при прокатке по данным опыта для рассматриваемого сортамента;

3) выбирают способ прокатки начиная с чистовых калибров;

4) уточняют коэффициенты вытяжки в каждом проходе  $\mu_i$ ;

5) рассчитывают размеры калибров начиная с чистовых;

6) рассчитывают энергосиловые параметры прокатки и условия захвата в каждой клети;

7) при необходимости корректируют расчеты.

На рис. 3.4 приведены примеры систем калибров для сортового проката.

Далее рассмотрим производство перечисленных видов полупродукта и готового проката в соответствии с рис. 3.1 на примерах.

### 3.3. Производство блюмов и слябов

Производство б л ю м о в рассмотрим на примере технологической линии блюминга 1300 (рис. 3.5).

На линии последовательно выполняются следующие технологические операции.

1. Подвоз слитков ж/д путем из сталелитейного цеха к нагревательным колодцам. Слитки массой 8—13 т имеют квадратное или прямоугольное сечение и подвозятся неостывшими (температура 400—900 °C).

2. Нагрев слитков в колодцах до 1200—1250 °C в течение 2,5—5 ч. В колодец загружают по 6—20 слитков. Загрузка и выгрузка слитков производятся мостовыми кранами с клещевыми захватами.



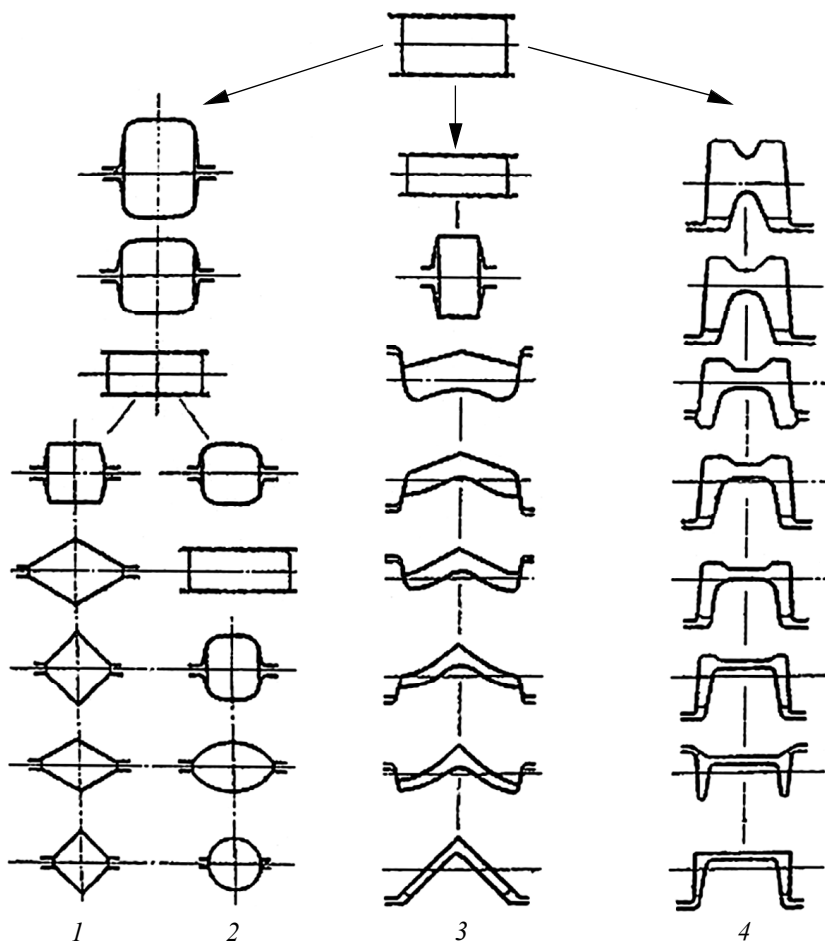


Рис. 3.4. Системы калибров для сортового проката:

1 — квадрат; 2 — круг; 3 — уголок; 4 — швеллер

3. Перевоз нагретых слитков к стану в слитковозах. Применяется кольцевая подача слитков, при этом 4 слитковоза непрерывно движутся по замкнутому кольцевому ж/д пути. Затем специальное устройство сталкивает слиток с платформы слитковоза в приемный рольганг стана.

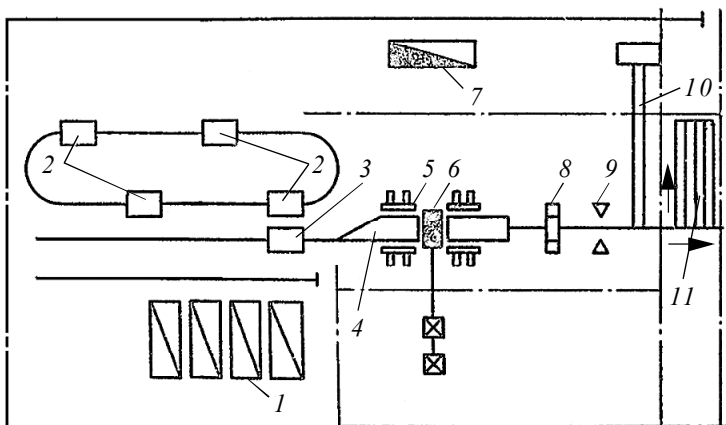


Рис. 3.5. Расположение оборудования блюминга 1300:

1 — нагревательные колодцы; 2 — слитковозы; 3 — сталкиватель слитков со слитковозов и весы; 4 — рабочий рольганг; 5 — манипуляторы с кантователем; 6 — рабочая клеть блюминга; 7 — яма (колодец) для окалины; 8 — машина огневой зачистки; 9 — ножницы; 10 — конвейер для уборки обреза; 11 — уборочные стеллажи и холодильник

4. Прокатка на блюминге — двухвалковом реверсивном стане. Рабочая клеть оборудована рабочими и раскатными рольгангами с передней и задней стороны стана, манипулятором с кантователями, устройствами для уборки скраба (окалины) из-под клетки и перевалки валков. На валках нарезаны от 3 до 5 ящичных калибров, в середине может быть гладкая бочка. Прокатка осуществляется за 9—13 проходов с реверсированием валков и кантовками раската на  $90^\circ$ .

5. Зачистка поверхностных дефектов (плен, трещин, рванин, шлаковых включений и др.) на машине огневой зачистки (МОЗ), установленной вслед за блюмингом. При зачистке с помощью газокислородных горелок сжигается поверхностный слой металла толщиной 1,5—2,5 мм, потери металла составляют 1—3 %.

6. Обрезка на ножницах усилием 12,5 МН дефектных концов раската, соответствующих прибыльной и донной части слитка, так-

же при необходимости производится разрезка раската на мерные длины. Доля обрезки составляет 10—25 % от массы слитка.

7. Транспортировка обрезки конвейером в скрапной пролет.

8. Транспортировка блюмов либо для дальнейшей прокатки на непрерывный заготовочный стан 900/700/500, либо на стеллажи-холодильники, где они могут взвешиваться на автоматических весах, обрабатываться на клеймовочной машине и передаваться на склад.

С л я б ы прокатывают из слитков массой 30—45 т. Расположение оборудования слябинга аналогично оборудованию блюминга, отличия заключаются в следующем: слябинг имеет две пары валков — горизонтальную и вертикальную; валки используются гладкие, без калибров, что повышает их прочность. После разрезки на ножницах слябы взвешиваются и поступают на дальнейшую прокатку на листовых станах (транзитом или с предварительным нагревом) либо к уборочным устройствам на склад слябов.

### 3.4. Горячекатаный лист

Прокатка производится из слябов на толстолистовых станах различной конструкции. Наибольшее распространение получили двух- и трехклетевые станы с последовательным расположением клеток (черновые и чистовая). Клетки могут быть двухвалковые (дуо), трехвалковые (трио), четырехвалковые (кварто) с опорными валками.

Рассмотрим последовательность основных технологических операций на примере стана 2800 (рис. 3.6)<sup>2</sup>. Стан предназначен для производства листов толщиной 5—50 мм, шириной 1 000—2 500 мм из углеродистых конструкционных и легированных сталей. Исходная заготовка — слябы толщиной 125—250 мм, шириной 700—1 600 мм, длиной 2,5—6 м и массой до 12 т.

---

<sup>2</sup> См.: Ляшков В. Б., Шимов В. В., Харитонин С. В. Технологические схемы прокатного и трубного производства : учеб. пособие для вузов. Екатеринбург : Изд-во УГТУ—УПИ, 2006. 129 с.

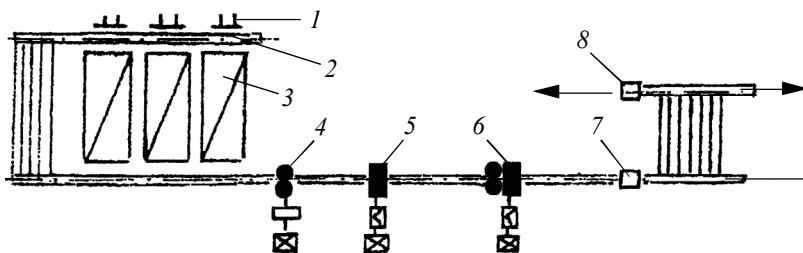


Рис. 3.6. Схема расположения основного оборудования толстолистного стана 2800:

1 — толкатели для загрузки печей; 2 — рольганг; 3 — методические печи; 4 — первая черновая клеть; 5 — вторая черновая клеть; 6 — чистовая клеть; 7 — роликовая правильная машина; 8 — линия отделки

Перечислим основные технологические операции.

1. Осмотренные и отремонтированные слябы подогревают в 3 методических печах, загрузка которых осуществляется толкателями с рольганга.

2. Прокат в трех клетях (см. рис. 3.6): а) черновой двухвалковой клетки с вертикальными валками для обжатия боковых кромок нагретых слябов и удаления окалины (см. рис. 3.6, 4); б) черновой реверсивной клетки с горизонтальными валками для обжатия по высоте (см. рис. 3.6, 5); с передней и задней сторон клетки установлены рольганги с коническими роликами, позволяющими разворачивать раскат на необходимый угол в горизонтальной плоскости, и манипуляторы для правильной задачи в валки, удаление окалины производится либо гидросбивом, либо паровзрывным способом с помощью валков с лунчатой поверхностью; в) чистовой универсальной клетки кварто с вертикальными и горизонтальными валками с возможностью получения катаной кромки (см. рис. 3.6, 6) .

3. Правка в горячем состоянии на роликоправильной машине.

4. Отделка листов, включающая холодную правку, осмотр, разметку, резку, термообработку, механические испытания, упаковку.

### 3.5. Заготовка

Заготовки сечением 40—250 мм из blooms 250—450 мм прокатывают на специализированных заготовочных станах, установленных непосредственно за блюмингом. Наибольшее распространение получили непрерывные (многоклетевые) заготовочные станы (НЗС).

Производство заготовок рассмотрим на примере непрерывного 14-клетевого стана 900/700/500 (рис. 3.7), установленного за блюмингом 1300<sup>3</sup>.

Двухвалковые клетки распределены по группам: две обжимных с диаметром валков 900 мм, шесть черновых (две с диаметром валков 900 мм и четыре — 700 мм), шесть чистовых с диаметром валков 500 мм. Обеспечивается чередование клеток с вертикальными и горизонтальными валками, что исключает необходимость кантовки полосы.

Рассмотрим последовательность выполняемых операций.

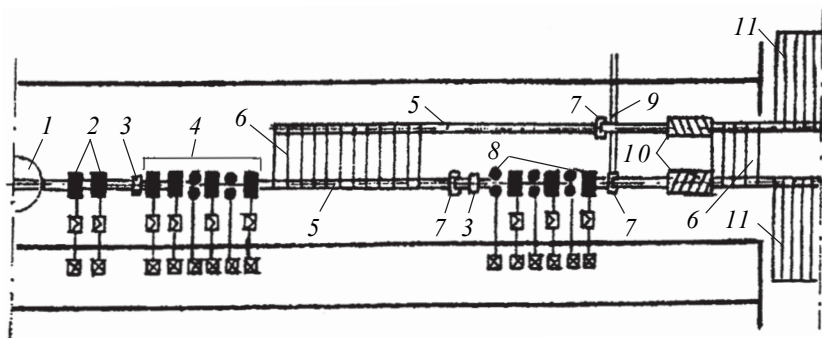


Рис. 3.7. Схема расположения оборудования заготовочного стана<sup>4</sup>:

1 — поворотное устройство; 2 — черновые обжимные клетки; 3 — кантовочные устройства; 4 — клетки черновой группы; 5 — рольганги; 6 — передающее устройство (шлеппер); 7 — ножницы для резки; 8 — чистовая группа клеток; 9 — установка для уборки и передачи обреза в скрапной пролет; 10 — пакетирующие рольганги; 11 — холодильники

<sup>3</sup> Подробнее см.: Ляшков В. Б., Шимов В. В., Харитонин С. В. Указ. соч. С. 39.

<sup>4</sup> Там же. С. 40.

1. Горячие блюмы без дополнительного подогрева по рольгангу подаются в 1-ю клеть НЗС. В случае обнаружения признаков усадочной рыхлости на переднем конце блюмы могут быть развернуты на  $180^\circ$  при помощи поворотного устройства.

2. Прокатка в первых двух обжимных клетях с горизонтальными валками.

3. Кантовка раската с помощью поворотной втулки на  $90^\circ$  и прокатка в шести клетях черновой группы до размера 150 мм.

4. Если не требуется прокатка в чистовой группе клетей (на размер менее 150 мм), заготовки по рольгангу обводной линии поступают на ножницы.

5. Обрезка передних и задних концов заготовок и резка на заданные длины, сбор в пакеты на пакетирующем рольганге.

6. Заготовки сечением 150 мм поступают по рольгангу на линию чистовой группы клетей и прокатываются до размера 80 мм. Перед прокаткой летучими ножницами обрезается передний разлохмаченный конец и может производиться кантовка на  $45^\circ$ .

7. Резка на мерные длины 8—12 м летучими планетарными ножницами.

8. Клеймение, сбор в пакеты на пакетирующем рольганге, охлаждение на холодильнике.

### 3.6. Сортовой прокат

Для прокатки сортового проката используются многоклетевые станы (до 17 клетей и более) с разнообразным расположением клетей (последовательным, параллельным, шахматным и др.).

Рассмотрим, например, состав крупносортового стана 700 (рис. 3.8).

В качестве исходной заготовки используются непрерывнолитые блюмы размером  $300 \times 360$  мм и длиной 6—12 м. Последовательно выполняются следующие технологические операции.

1. Нагрев блюмов в нагревательных печах с шагающими балками до  $1200\text{—}1250^\circ\text{C}$ , удаление окалины гидросбивом на специальной установке.

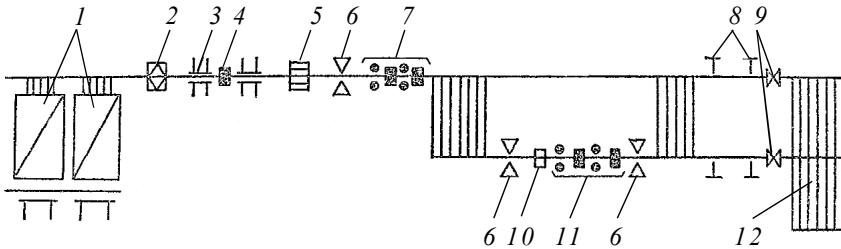


Рис. 3.8. Схема расположения оборудования крупносортного стана:

1 — нагревательные печи; 2 — установка гидросбива окалины; 3 — манипуляторы и кантователи; 4 — обжимная реверсивная клеть; 5 — машины огневой зачистки; 6 — ножницы; 7 — первая непрерывная группа клетей; 8 — пила горячей резки; 9 — клеймочные машины; 10 — кантователь; 11 — вторая группа клетей; 12 — шлепперы для передачи металла к холодильникам и в отделение отделки

2. Прокатка в обжимной двухвалковой реверсивной клети 950 с ящичными калибрами. Клеть оборудована манипуляторами и кантователями.

3. Обрезка переднего конца на ножницах, обработка поверхности на машине огневой зачистки (МОЗ).

4. Прокатка в первой непрерывной группе клетей до круглого профиля диаметром 100—180 мм с использованием системы калибров овал — круг.

5. Для получения более мелкого профиля используется вторая непрерывная группа клетей с чередованием вертикальных и горизонтальных валков. Каждая группа клетей имеет отводящий рольганг, где установлены стационарная и передвижные пила горячей резки на длины 9—15 м и клеймочные машины.

6. При необходимости проводятся отжиг проката в печах, охлаждение на холодильниках и транспортировка на промежуточный склад.

7. На линии отделки производится очистка от окалины, правка, зачистка поверхностных дефектов, резка на мерные длины, клеймение, упаковка.

### 3.7. Катанка

Технологию прокатки катанки из высокоуглеродистых и легированных сталей в бунтах рассмотрим на примере проволочного стана 150 (рис. 3.9). Используется исходная заготовка размером  $200 \times 200$  мм.

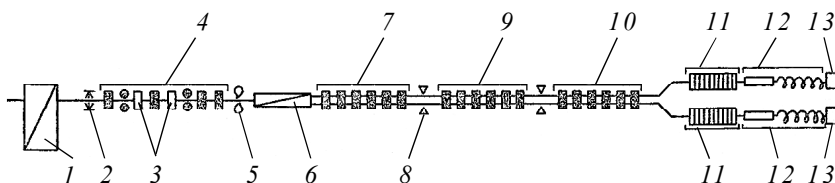


Рис. 3.9. Схема расположения оборудования непрерывного проволочного стана:

1 — нагревательная печь; 2 — машина огневой зачистки; 3 — машины термофрезерной зачистки; 4 — обжимная группа клеток; 5 — летучие ножницы; 6 — роликовая печь; 7 — черновая группа клеток; 8 — ножницы; 9, 10 — первая и вторая промежуточные группы клеток; 11 — чистовые блоки клеток; 12 — устройства двухстадийного охлаждения; 13 — устройства для сбора витков и уплотнения бунтов

Технология производства включает следующие операции:

1. Нагрев заготовок в печи с шагающим подом.
2. Огневая зачистка заготовок на МОЗ.
3. Прокатка в обжимной группе из 6 клеток с промежуточной термофрезерной зачисткой.
4. Разрезка на летучих ножницах и подогрев в двухрядной роликовой печи до температуры  $1200^\circ\text{C}$ .
5. Прокатка в две нитки в черновой и первой промежуточной группе клеток, разрезка на летучих ножницах.
6. Прокатка в одну нитку в двух вторых промежуточных группах и двух чистовых 10-клетевых блоках со скоростью до 100 м/с.
7. Двухстадийное охлаждение проволоки: 1-я стадия — в трубах воды высокого давления до  $630^\circ\text{C}$ ; 2-я стадия — раскат раскладывают специальным устройством (виткообразователем) на транспортере в виде распушенных витков. Далее осуществляют свора-



чивание в накопителе витков, который уплотняется гидравлическим прессом и поступает на крюковой конвейер.

### 3.8. Холоднокатаный лист

На станах холодной прокатки производят листовую сталь толщиной 0,2—5 мм и шириной 200—2 300 мм. Исходная заготовка — горячекатаная листовая сталь в рулонах со станом горячей прокатки. Чаще всего используют многоклетевые непрерывные станы холодной прокатки с четырехвалковыми клетями (кварто) (рис. 3.10).

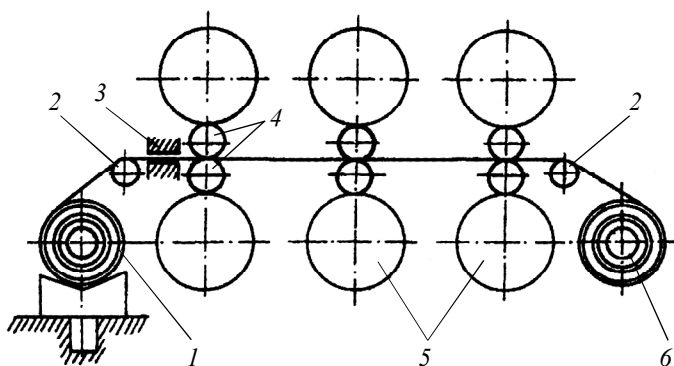


Рис. 3.10. Схема непрерывного стана холодной прокатки листа:

1 — разматыватель; 2 — правильно-подающие ролики; 3 — прижимной стол; 4 — рабочие валки; 5 — опорные валки; 6 — намоточный барабан

Технологический процесс включает следующие операции.

1. Подготовка листов к прокатке на непрерывных травильных агрегатах:

- разматывание рулона, правка полосы и сваривание концов;
- взламывание окалины перегибанием полосы вокруг роликов и прокаткой с обжатием 3—8 % в дрессировочной клети;
- окончательное удаление окалины химическим или электрохимическим травлением в серной или соляной кислоте;

- обрезка неровной боковой кромки дисковыми ножницами;
- промасливание полосы и сворачивание в рулон до 50 т;
- при необходимости термообработка в проходной печи.

2. Прокатка на непрерывных 3—5-клетевых станах (четырёх-валковые клетки кварто с опорными вальками, см. рис. 3.10), оборудованных размотателем и правильно-подающими роликами. Для уменьшения давления рабочие вальки имеют меньший диаметр, чем опорные, прокатка ведется с передним и задним натяжением полосы, в качестве смазок применяются водно-масляные эмульсии. Для управления толщиной полосы используются системы автоматического регулирования толщины (САРТ).

3. Рекристаллизационный отжиг для снятия наклепа, снижения анизотропии свойств, образовавшейся за счет вытягивания зерен металла при прокатке.

4. Дрессировка — прокатка без смазки с обжатием 0,5—3 %. Цель — правка, проглаживание и поверхностное упрочнение листа для предотвращения образования грубых полос скольжения при последующей холодной штамповке.

5. Отделка и защитное покрытие листов на специальных установках непрерывного действия. Для покрытий используются масла, пластмассы, лаки, олово, цинк, алюминий. Далее листы обрабатываются на агрегатах продольной и поперечной резки (обрезается неровная кромка, полоса разделяется на листы и т. п.).

## 4. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ВОЛОЧЕНИЯ

### 4.1. Преимущества и недостатки процесса волочения

**В о л о ч е н и е** — это протягивание длинномерной заготовки через калиброванное коническое отверстие волочильного кольца (волоки). Заготовки для волочения — сплошные (катаные и прессованные) круглые и фасонные профили в бухтах или отрезках, бесшовные и сварные трубы.

Готовые изделия волочильных цехов — проволока диаметром от 0,01 до 6 мм, трубы диаметром до 400 мм, калиброванные прутки и профили, профильные (овальные, прямоугольные и др.) трубы.

Для осуществления волочения уменьшают диаметр переднего конца заготовки путем острения, плющения или заковки, пропускают его через отверстие волочильного кольца и задают в захваты волочильного стана для осуществления волочения путем приложения растягивающего усилия к переднему концу заготовки. Волочение проводят в холодном состоянии, что способствует упрочнению металла и получению хорошего качества поверхности, однако коэффициент вытяжки  $\mu = \frac{L_k}{L_0}$  (2.18) за один проход ограничен прочностью переднего конца и обычно не превышает 1,2...1,5.

Процесс волочения имеет следующие **п р е и м у щ е с т в а**:

- простота оборудования и инструмента;
- высокая производительность;
- возможность получения изделий большой длины, свернутых в бухту;

- применение калиброванных волок, позволяющих получать разнообразные профили;

- высокая точность и качество поверхности.

Недостатки волочения:

- малые коэффициенты вытяжки за один проход, необходимость применения многопроходных схем;

- большие скольжения на контакте с неподвижной волокой могут вызвать образование рисок на поверхности;

- повышенный расход металла на подготовку переднего конца;

- возможная кривизна изделий и необходимость их правки.

## 4.2. Классификация процессов волочения

Волочение классифицируют в основном по виду получаемых изделий: 1) волочение прутков и труб, 2) бухтовое (получение изделий, свернутых в бухты) и 3) линейное (получение мерных изделий).

На рис. 4.1 приведены схемы волочения прутков и труб. При волочении труб для уменьшения толщины стенки применяются короткие, длинные и самоустанавливающиеся оправки. Один из важнейших параметров калибровки волоки — полуугол конусности рабочего канала  $\alpha$ , который выбирается из условия минимума усилия волочения. Из этого условия волочение прутков ведется при меньших углах  $\alpha = 5 \dots 12^\circ$ , а волочение труб — при  $\alpha = 12 \dots 15^\circ$ .

Для примера рассмотрим технологические операции, выполняемые при волочении проволоки. В качестве исходной заготовки используется катанка, производство которой рассмотрено в подразделе 3.7. Технологический процесс начинается с подготовки катанки:

- 1) травление для удаления окалины и ржавчины в растворах серной и соляной кислот в машинах периодического и непрерывного действия, промывка горячей водой;

- 2) нанесение подсмазочного покрытия (желтение, меднение или фосфатирование) и смазки (мыло, водные эмульсии минерального масла и мыла, хлорпарафин);

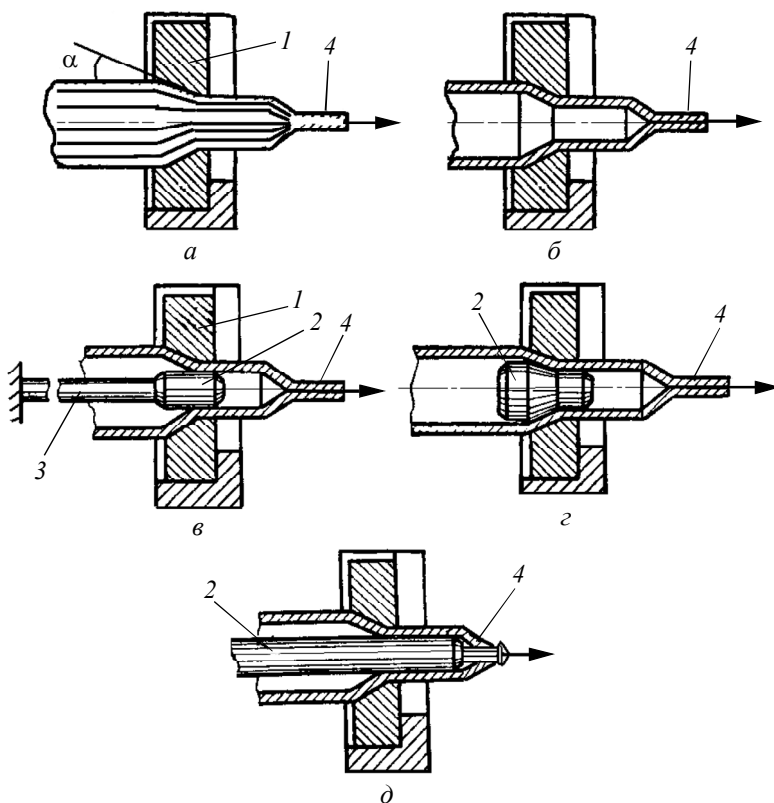


Рис. 4.1. Схемы волочения прутка (а) и труб (б—д):

б — без оправки; в — короткооправочное; г — на самоустанавливающейся оправке;  
 д — длиннооправочное;  
 1 — волока; 2 — оправка; 3 — стержень для крепления оправки; 4 — закованный  
 конец;  $\alpha$  — полуугол конусности рабочего канала

- 3) подготовка переднего конца (острение или плющение);
- 4) многократное волочение на непрерывных многониточных линейных либо барабанных станах (между проходами проводятся операции травления, термообработки, нанесения подмазочного покрытия и смазки);
- 5) термообработка (отжиг, закалка и отпуск в зависимости от требований к механическим свойствам);

б) отделка (правка, шлифовка, полировка, нанесение защитных покрытий).

Волочение проволоки чаще всего осуществляют на барабанных станах многократного волочения (рис. 4.2), которые могут работать в режимах без скольжения проволоки относительно барабанов и со скольжением.

В схеме без скольжения (рис. 4.2, а) окружные скорости барабанов не связаны жесткой связью, необходимо, чтобы на каждом предыдущем барабане сохранялся запас проволоки. Сматывание проволоки во избежание ее скручивания производится через систему роликов.

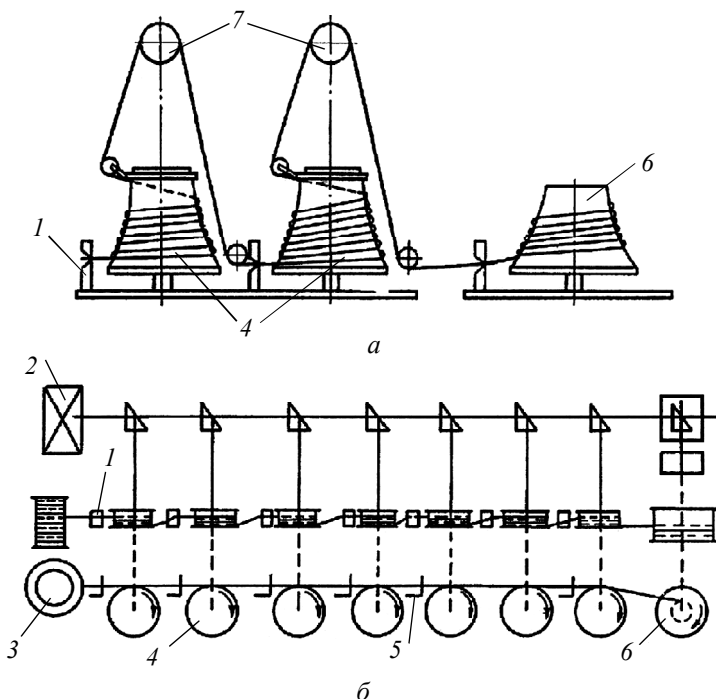


Рис. 4.2. Схемы многократного волочения проволоки без скольжения (а) и со скольжением (б):

1 — волокни; 2 — двигатель; 3 — катушка с катанкой; 4 — рабочие барабаны; 5 — волокодержатели; 6 — приемный барабан

---

При волочении со скольжением (рис. 4.2, б) за каждый оборот тягового барабана на него наматывается один виток проволоки и один виток сматывается, для этого окружные скорости барабанов должны быть жестко связаны условием постоянства секундных объемов. Однако это условие не всегда выполняется в связи с износом волок, неточностью изготовления, что приводит к проскальзыванию проволоки относительно барабанов и повышенному износу их рабочей поверхности.

## 5. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ КОВКИ И ШТАМПОВКИ

Кузнечно-штамповочное производство (КШП) включает технологические процессыковки и штамповки. Основная область применения этих процессов — изготовление деталей машин и приборов в машиностроении и приборостроении, а также товаров ширпотреба. Процессыковки и штамповки относят к нестационарным, т. е. очаг деформации (пластически деформируемая область) изменяется с течением времени. Эти процессы характеризуются в большинстве случаев многократным и ударным воздействием на металл, в отличие от прокатки, прессования и волочения. Технологический процесс разрабатывается «от детали», которую надо получить, с учетом заключительной механической обработки.

### 5.1. Технологияковки

К о в к а — это способ ОМД путем местного приложения деформирующих нагрузок с помощью универсального инструмента. В качестве универсального инструмента используются бойки и подкладной инструмент. При ковке инструмент действует на часть поверхности заготовки, а оставшаяся часть формируется свободно. Ковка применяется в единичном (например, для уникальных поковок типа роторов турбин) и мелкосерийном производстве (до 1000 т поковок в год), например производстве валов или дисков.

К преимуществам процессаковки относят простоту и универсальность инструмента и операцийковки; достаточно высокую производительность; возможность получения формы поковки, приближенной к форме детали; хорошую проработку структуры металла; высокие механические свойства поковок.



Недостатки связаны с большим коэффициентом использования металла

$$K_{\text{им}} = \frac{G_{\text{д}}}{G_0}, \quad (5.1)$$

где  $G_{\text{д}}$  — масса детали,  $G_0$  — масса заготовки.

При ковке слитков  $K_{\text{им}} \leq 0,45$ , при ковке катаной и кованой заготовки  $K_{\text{им}} \leq 0,5$ , что связано со значительным расходом металла на кузнечные напуски и токарную обработку<sup>1</sup>. Также к недостаткамковки можно отнести большую энергоемкость кузнечных машин, прессов и молотов, нагревательных печей.

В качестве исходной заготовки дляковки в начале технологического цикла ОМД применяются кузнечные слитки (см. подраздел 2.5), а также в дальнейшем — сортовой прокат либо прессованный пруткокруглого и квадратного сечений, порезанные на мерные длины.

Различаютковку на прессах и молотах. Ковкой на прессах получают более крупные поковки из слитков массой до 350 т. Согласно ГОСТу 7062—90 прессовые поковки из углеродистых и легированных сталей могут иметь длину до 20 м и поперечный размер — до 2,1 м и выпускаются при единичном и мелкосерийном производстве. Это единственный способ изготовления крупных роторов и турбин для гидроэлектростанций, оружейных стволов, колонн гидравлических прессов, крупных валков прокатных станов и других массивных деталей.

Ковкой на молотах получают поковки более мелких размеров в соответствии с ГОСТом 7829—70 — до 6 м длиной и 360 мм в поперечном размере. Исходной заготовкой служит слиток до 2—3 т для углеродистых сталей и до 1 т для легированных, также прокат и прессованная заготовка.

---

<sup>1</sup> См.: Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства : учеб. для вузов. М. : Машиностроение, 1976. 560 с.

### 5.1.1. Классификация поковок

Основные типы поковок рассмотрим в соответствии с ГОСТом 7062—90 (15 типов поковок на прессах) и ГОСТом 7829—70 (18 типов поковок на молотах). Обобщая эти данные, можно выделить следующие основные типы поковок.

1. Поковки удлиненной формы  $L \geq (1,2 \dots 1,5)D$  ( $H$ ), где  $L$  — длина,  $D$  — диаметр,  $H$  — поперечный размер) (рис. 5.1,  $a—e$ ):

— сплошные круглого сечения — валы (гладкие, с уступами, с выемкой, с буртом, с фланцем);

— сплошные прямоугольного (квадратного) сечения тех же типов;

— полые (с отверстием) (полые валы)  $d \geq 0,5D$ .

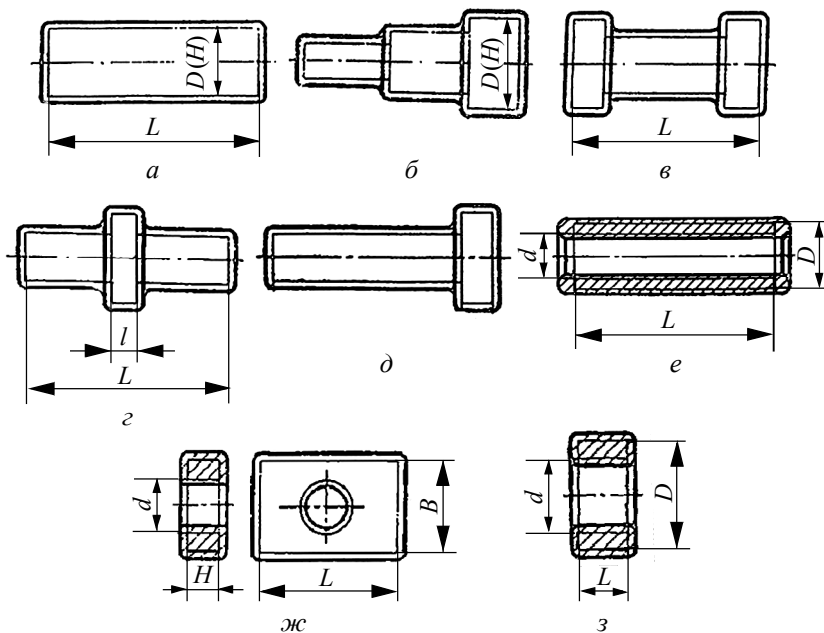


Рис. 5.1. Типы поковок:

удлиненной формы ( $a—e$ ):  $a$  — гладкие,  $б$  — с уступами,  $в$  — с выемкой,  $г$  — с буртом,  $д$  — с фланцем,  $е$  — полые;  $ж$  — бруски, кубики, пластины с отверстием;  $з$  — диски и кольца

2. Поковки умеренной длины ( $0,5D(H) \leq L \leq (1,2 \dots 1,5)D(H)$ ):
- цилиндры (рис. 5.1, а);
  - бруски, кубики, пластины без отверстия ( $H \leq B, B \leq L \leq 1,5B$ ) и с отверстием,  $d < 0,5B$  (рис. 5.1, ж);
  - раскатные кольца,  $d \geq 0,5D$  (рис. 5.1, з);
  - муфты, втулки,  $d < 0,5D$  (рис. 5.1, е).
3. Короткие поковки — диски ( $L \leq 0,5D$ ;  $0,2D \leq L \leq 0,5D$ ) без отверстия и с отверстием,  $d \leq 0,5D$  (рис. 5.1, з).

### 5.1.2. Операцииковки

В соответствии с ГОСТом 18970—84 кузнечные операции подразделяются на разделительные и формоизменяющие.

**Р а з д е л и т е л ь н ы е о п е р а ц и и** (рис. 5.2) предназначены для полного или частичного отделения одной части заготовки от другой. Применяются следующие виды разделительных операций.

**Н а д р у б к а** — образование углублений на заготовке за счет внедрения кузнечного инструмента на неполную толщину заготовки.

**О т р у б к а** — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем внедрения инструмента.

**Р а з р у б к а** — разделение поковки на части путем внедрения инструмента.

В качестве накладного универсального инструмента применяются топоры различных форм и размеров.

**Ф о р м о и з м е н я ю щ и е о п е р а ц и и** — это операцииковки, в результате которых изменяется форма заготовки путем пластического деформирования. При ковке применяются следующие основные операции.

**О с а д к а д а в л е н и е м** — уменьшение высоты заготовки при увеличении площади ее поперечного сечения.

Это основная операция при ковке коротких поковок типа дисков. Во избежание потери устойчивости заготовки отношение ее высоты к наружному диаметру должно быть  $H_0/D_0 \leq 2,5$ . Осадка

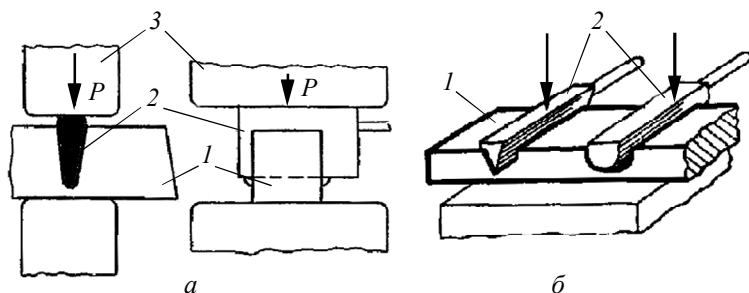


Рис. 5.2. Разделительные операции:

*a* — отрубка, разрубка; *б* — надрубка;

1 — поковка; 2 — разделительный инструмент (топоры); 3 — бойки

может производиться плоскими бойками (плитами) (рис. 5.3, *a*), а также кольцевыми плитами (рис. 5.3, *б*). Во втором случае образуются концевые участки (галтели), которые используются в качестве захватов при дальнейшей ковке. Различают также операцию высадки — осадки части заготовки (рис. 5.3, *в*). Величину обжатия при осадке оценивают относительным обжатием по высоте  $\Delta H/H_0$  либо коэффициентом уковки или уковом

$$y = \frac{H_0}{H}.$$

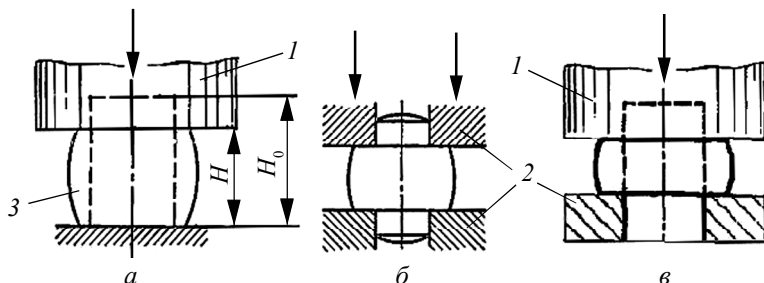


Рис. 5.3. Разновидности осадки давлением:

*a* — осадка плоскими плитами (бойками); *б* — осадка кольцевыми плитами; *в* — высадка;

1 — плоская плита (боек); 2 — кольцевые плиты; 3 — осажённая заготовка

При осадке относительное обжатие по высоте обычно не превышает 0,5, а уков  $Y \leq 2$ .

**Протяжка кузнечная** — это удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Этой операции может подвергаться сплошная либо полая заготовка (рис. 5.4), при этом для утонения стенок поковки применяется оправка.

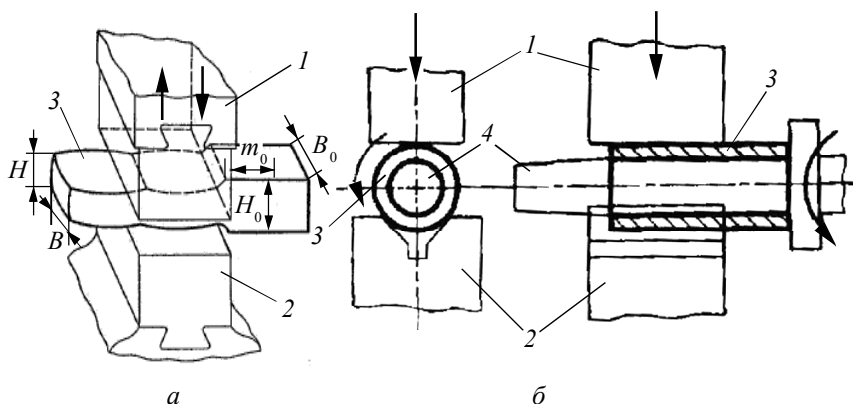


Рис. 5.4. Протяжка кузнечная сплошной (а) и полой (б) заготовки:

1 — верхний боек; 2 — нижний (вырезной) боек; 3 — поковка; 4 — оправка;  
 $H$  — высота после протяжки;  $H_0$  — исходная высота;  $B$  — ширина после протяжки;  
 $B_0$  — исходная ширина;  $m_0$  — величина подачи

Протяжка применяется для изготовления поволоков удлиненной формы (валов, муфт и др.) и осуществляется путем многократных обжатий заготовки с продвижением ее на величину подачи  $m_0$  (рис. 5.4, а) и кантовками. Величину обжатия за всю операцию оценивают уковом

$$Y = \frac{F_0}{F} = \frac{B_0 \cdot H_0}{B \cdot H} = \frac{L}{L_0},$$

где  $F_0$ ,  $L_0$  — соответственно площадь поперечного сечения и длина исходной заготовки;  $F$ ,  $L$  — то же после протяжки.

Протяжка отличается от других способов ОМД периодичностью и многократностью обжатий, что способствует хорошей проработке литого металла и повышению механических свойств ковкого металла. Для достижения заданного уровня механических свойств при прессовании и прокатке необходимы коэффициенты вытяжки 7—10, а при протяжке углеродистой стали достаточен уков 1,5—2, легированной стали — 3—4, что свидетельствует о высокой эффективности этой операции.

Для протяжки поковок прямоугольного сечения применяются плоские бойки, а для протяжки по схеме «круг — круг» — вырезные ромбические, радиусные бойки, а также комбинированные (верхний — плоский, нижний — вырезной).

**Прошивка** — это операцияковки с целью образования несквозной полости в заготовке за счет свободного вытеснения металла (рис. 5.5). Эту операцию применяют обычно после операции осадки при изготовлении полых поковок типа муфт, дисков с отверстием и колец.

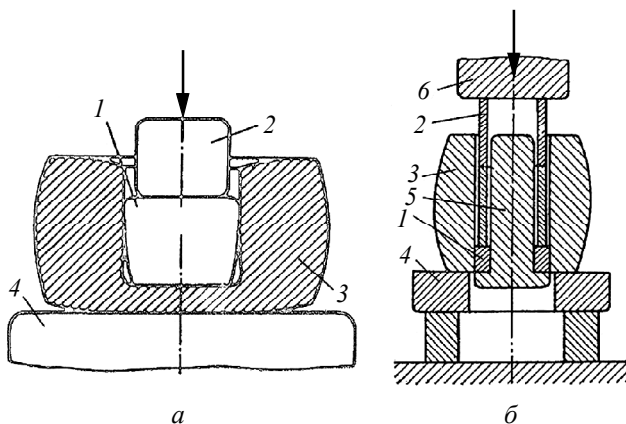


Рис. 5.5. Операция прошивки сплошным (а) и пустотелым (б) прошивнем:

1 — прошивень; 2 — надставки; 3 — прошиваемая заготовка; 4 — подкладная плита; 5 — отход (выдра); 6 — нажимной боек

Прошивка может проводиться сплошным (рис. 5.5, *а*) или пустотелым (рис. 5.5, *б*) прошивнем. Во втором случае удаляется менее качественная сердцевина слитка. Прошивка высоких заготовок ( $D/H < 6$ , где  $D$  и  $H$  — диаметр и высота заготовки перед прошивкой) осуществляется с двух сторон, для чего заготовка (прошитая до стадии, показанной на рис. 5.5, *а*) переворачивается и прошивается насквозь с другой стороны, причем прошивень вводят тупым концом.

При прошивке образуется отход (выдра) в виде перемычки при применении сплошного прошивня либо центральной части, удаляемой пустотелым прошивнем. Отход составляет обычно 8—12 % массы заготовки.

**Р а с к а т к а** — увеличение диаметра кольцевой заготовки за счет уменьшения толщины стенки путем последовательного воздействия инструмента (рис. 5.6).

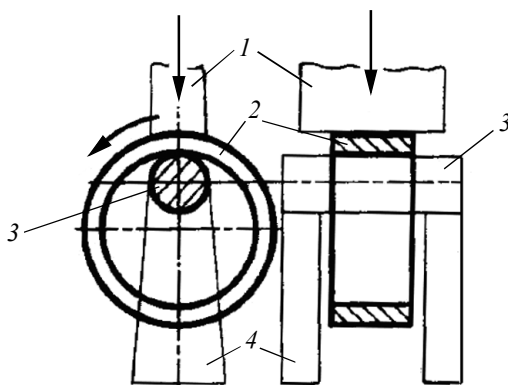


Рис. 5.6. Раскатка:

1 — верхний боек; 2 — поковка-кольцо; 3 — оправка; 4 — стойки люнета

Эта операция применяется дляковки поковок типа раскатных колец, толщина стенки которых много меньше диаметра. Операцию раскатки можно представить как протяжку заготовки, концы которой соединены между собой, причем длина заготовки равна

длине средней окружности кольца, толщина — толщине его стенки. Поэтому уков при раскатке определяется так:

$$y = \frac{D_{\text{ср}}}{D_{0\text{ср}}},$$

где  $D_{\text{ср}}$  и  $D_{0\text{ср}}$  — соответственно средние диаметры раскатанного кольца и исходной заготовки.

Для раскатки прошиту заготовку 2 (см. рис. 5.6) подвешивают с оправкой 3 на стойки 4 и обжимают между узким плоским бойком 1 и круглой или овальной оправкой 3, постепенно вращая заготовку для перехода к следующему недеформированному участку. Обычно поковку получают за несколько (до 9) оборотов.

**Обкатка** — придание заготовке (слитку) цилиндрической формы путем деформирования, чередующегося с поворотами заготовки вокруг своей оси.

Обкатке чаще всего подвергается многогранный слиток в начале технологического цикла (рис. 5.7). Полученная цилиндрическая заготовка для дальнейшейковки (осадки и протяжки) обычно называется билетом, а сама операция — билетировкой, однако использование этого термина запрещает ГОСТ 18970—84.

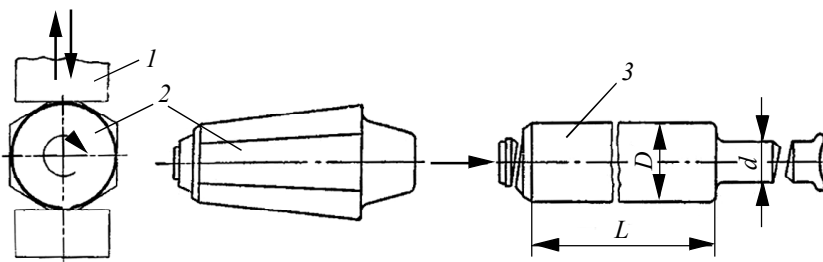


Рис. 5.7. Обкатка:

1 — боек; 2 — обкатываемый слиток; 3 — слиток после обкатки

**Передача** — смещение одной части заготовки относительно другой при сохранении параллельности осей или плоскостей частей заготовки (рис. 5.8). Операция применяется дляковки поковок с изогнутой осью, например, коленчатых валов.



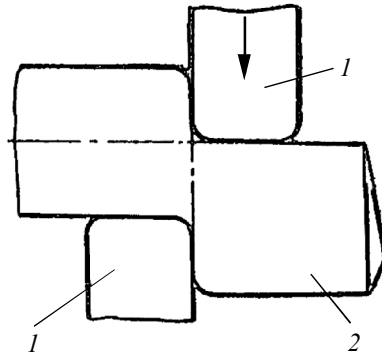


Рис. 5.8. Операция передачи:

1 — бойки, 2 — поковка

Реже, кроме вышеперечисленных операций, применяются операции г и б к и (образование или изменение углов между частями заготовки), р а з г о н к и (увеличение размеров в плане заготовки или ее части за счет уменьшения толщины), с к р у ч и в а н и я (поворот части заготовки вокруг продольной оси), с в а р к и.

На заключительной стадии применяют отделочные операции: с б и в к а у г л о в, п р о г л а ж и в а н и е (устранение неровностей поверхности), п р а в к а, к л е й м е н и е.

Для получения требуемой формы и качества металла поковки применяют чередование операций с промежуточным подогревом поковки. Примеры технологических переходовковки некоторых видов повок будут приведены ниже. Суммарный уков за несколько операций определяется, аналогично коэффициенту вытяжки при прокатке, произведением

$$Y_{\Sigma} = Y_1 \cdot Y_2 \cdot Y_3 \cdot \dots \cdot Y_n. \quad (5.2)$$

Установлено, что с повышением укова механические свойства металла возрастают, однако имеется значительная анизотропия свойств вдоль и поперек волокна. Для уменьшения анизотропии применяют различные комбинации способовковки осадкой и протяжкой. Например, рекомендуются следующие суммарные уковы

для получения оптимальных механических свойств поковок из слитков в продольном направлении<sup>2</sup>:

Масса слитка, т	1	3	5	10	30	80	200
$У_{\Sigma}$	2,5	2,7	2,8	3,0	3,25	3,5	3,75

### 5.1.3. Этапы разработки технологии

Технологический процессковки разрабатывается в следующей последовательности.

1. Выбор способаковки (на молотах или прессах) путем технического и экономического сопоставления возможных вариантов.

2. Разработка чертежа поковки по чертежу детали (назначение припусков на механическую обработку, допусков на ковку, напусков на невыполнимые элементы).

3. Определение объема и массы заготовки (слитка) по чертежу поковки.

4. Установление величины необходимого укова и определение размеров заготовки или слитка.

5. Определение вида, числа и последовательности кузнечных операций, потребности нагрева, их режимов, конструирование инструмента.

6. Выбор оборудования дляковки.

7. Составление технологической карты.

Рассмотрим основные этапы более подробно.

При разработке чертежа поковки припуски, допуски и напуски назначают по таблицам ГОСТа 7062—90 (ковка на прессах), либо по ГОСТу 7829—70 (ковка на молотах) в зависимости от типа поковок и соотношения их размеров.

**П р и п у с к** — предусмотренное превышение размеров поковки против номинальных размеров детали, обеспечивающее после обработки резанием требуемые чертежом размеры детали и чистоту ее поверхности.

<sup>2</sup> Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства... С. 212.

**Н а п у с к** — увеличение припуска, упрощающее конфигурацию поковки ввиду невозможности или нерентабельности изготовления поковки по контуру детали.

**Д о п у с к** на кузнечную обработку — разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами поковки.

Схема назначения припусков и допусков приведена на рис. 5.9, где обозначены следующие размеры:  $H_0$  — номинальный размер детали;  $H$  — номинальный размер поковки;  $H_{\min} = H_0 + \delta_{\min}$  — наименьший размер поковки;  $\delta_{\min}$  — наименьший припуск на размер  $H_0$ ;  $H_{\max} = H + \Delta/2$  — наибольший размер поковки;  $\Delta = H_{\max} - H_{\min}$  — поле допуска;  $\delta = H - H_0$  — номинальный припуск на размер  $H_0$ .

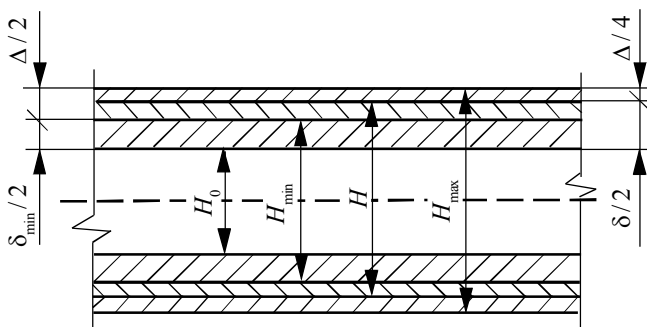


Рис. 5.9. Припуски и допуски на ковку по ГОСТу 7062—90

Пример чертежа поковки приведен на рис. 5.10, где тонкими линиями изображен контур детали после механической обработки, толстыми — контур поковки. Например, при изготовлении концевой части детали диаметром 420 мм установлен припуск на механическую обработку 36 мм, а допуск на ковку  $\pm 10$  мм.

Далее по чертежу поковки определяется масса заготовки (слитка)  $G_0$ :

$$G_0 = G_{\text{п}} + G_{\text{обс}} + G_{\text{в}} + G_{\text{у}} + G_{\text{прд}},$$

где  $G_{\text{п}}$  — масса поковки;  $G_{\text{обс}}$  — отходы на обесечки (до 5 %);  $G_{\text{в}}$  — выдра, масса отхода при прошивке (до 8—12 %);  $G_{\text{у}}$  — масса угара

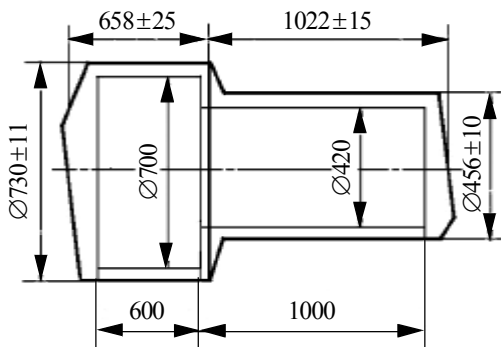


Рис. 5.10. Чертеж поковки с уступом

при нагреве и подогреве (2 %);  $G_{\text{прд}}$  — масса обрубаемых прибыльной (до 35 %) и донной (до 10 %) частей слитка.

Далее по вышеприведенным рекомендациям устанавливают необходимую величину суммарного укова  $Y_{\Sigma}$  для достижения требуемого уровня механических свойств и проработки структуры металла:  $Y_{\Sigma} \geq 2,5$  для углеродистых и  $Y_{\Sigma} \geq 3 \dots 4$  для легированных сталей. По величине  $Y_{\Sigma}$  определяют габариты слитка или заготовки:

$$F_0 = Y_{\Sigma} \cdot F_{\text{п}},$$

где  $F_0$ ,  $F_{\text{п}}$  — соответственно площадь поперечного сечения слитка (заготовки) и максимальная площадь поковки.

Для выбора ковочного оборудования необходимо определить усилие деформирования, которое зависит от сопротивления деформации сплава, габаритов поковки, режимов выполнения операции (например, подача при протяжке) и других факторов. Однако на производстве пресс или молот определяют по массе и размерам слитка или поковки по накопленным опытным данным. Например, пресс усилием 10 МН выбирают дляковки слитка массой 4—8 т, а пресс 30 МН — для слитка 30—60 т<sup>3</sup>. Аналогично назначают молот: дляковки вала массой 100 кг выбирают молот с массой падающих частей 500 кг, а дляковки вала 750 кг — молот 3000 кг.

<sup>3</sup> См. об этом: Охрименко Я. М. Указ. соч... С. 226.

Рассмотрим примеры технологических переходов при ковке различных видов поковок. Ковка поковки в зависимости от ее сложности осуществляется чередованием операций за несколько выносов. В кузнечном производстве **выносом** называется промежуток времени между нагревами слитка (заготовки), во время которого проводится ковка.

Рассмотрим переходы при ковке вала (рис. 5.11). В данном случае основные операции выполняются в следующей последовательности.

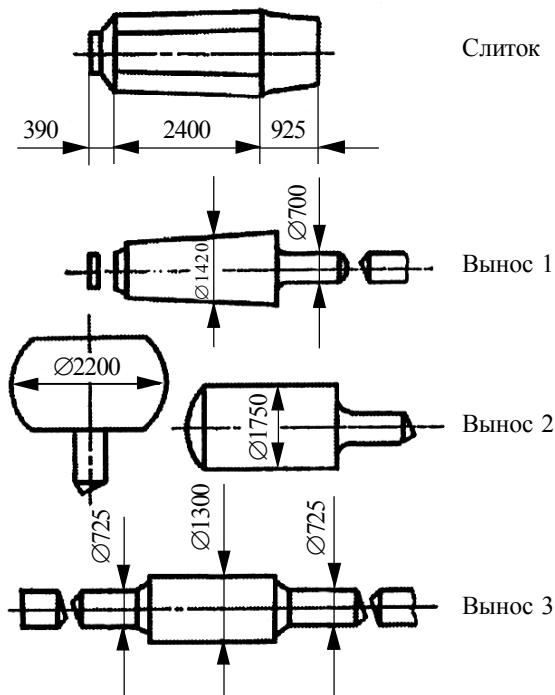


Рис. 5.11. Последовательность операций при ковке опорного вала

1. Нагрев слитка. Вынос 1: протяжка прибыльной части слитка под патрон и обкатка слитка (биллетировка).

2. Нагрев. Вынос 2: осадка биллета в кольцо и протяжка осаженного блока.

3. Нагрев. Вынос 3: протяжка бочки и уступов вала до требуемых размеров.

В качестве еще одного примера рассмотрим технологиюковки пустотелого вала из коррозионно-стойкой стали на прессе 120 кН (рис. 5.12) с температурным интерваломковки 1150—950 °С.

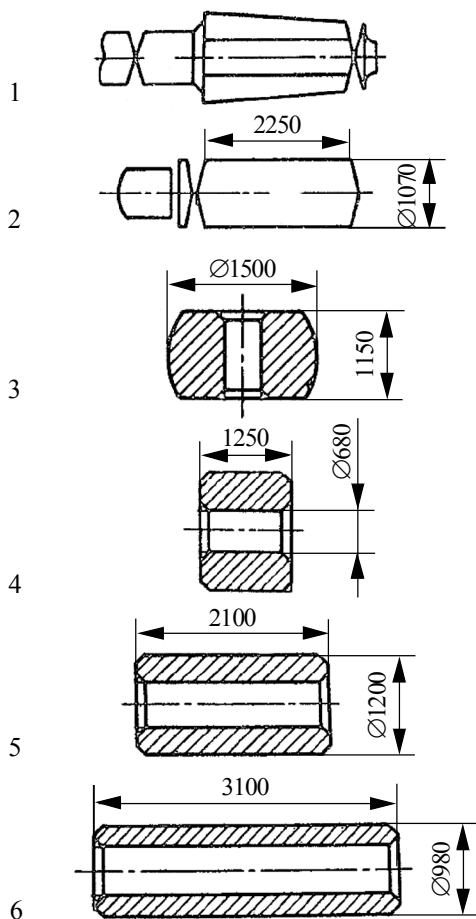


Рис. 5.12. Последовательность операций при ковке пустотелого вала

Технологический процесс включает следующие операции:

1. Нагрев слитка до 1120—1150 °С. Вынос 1: ковка цапфы из прибыльной части слитка, отрезка донной части.
2. Подогрев слитка. Вынос 2: обкатка слитка на диаметр 1070 мм на плоских бойках, обрубка цапфы.
3. Подогрев поковки. Вынос 3: осадка плоскими плитами с высоты 2250 до 1150 мм (уков при осадке около 2), прошивка с двух сторон сплошным прошивнем.
4. Подогрев поковки. Вынос 4: небольшая раскатка на оправке как кольца с увеличением внутреннего диаметра до 680 мм.
5. Подогрев поковки. Вынос 5: протяжка на конической оправке диаметром 650/620 мм в комбинированных бойках длиной от 1250 до 2100 мм.
6. Подогрев поковки. Вынос 6: протяжка на конической оправке длиной от 2100 до 3100 мм (суммарный уков за протяжку 2,5).

Суммарный уков примерно равен 5.

Рассмотрим далее технологиюковки диска с отверстием (рис. 5.13).

Технологический процесс начинается с нагрева слитка, далее выполняются следующие операции (см. рис. 5.13):

1. Ковка цапфы из прибыльной части слитка, обкатка (проковка) слитка до диаметра  $D$ .
  2. Отрубка концевых частей слитка и  $n$  заготовок размерами  $1,2 \leq H/D \leq 2,4$ .
  3. Осадка заготовки до высоты  $H_1$  с уковом примерно 2, соотношение размеров осаженой заготовки  $D_1/H_1 \leq 5,2$ .
  4. Прошивка отверстия диаметром  $d$ .
  5. Обкатка на оправке диаметром  $d_0 = d - 15$  мм.
- Поковка производится за 2—3 выноса.

## 5.2. Технология штамповки

ГОСТ 18970—84 устанавливает следующие определения процессов штамповки.

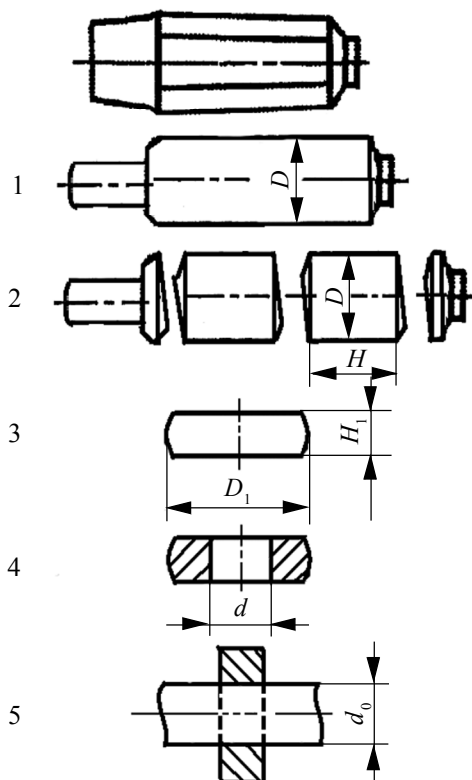


Рис. 5.13. Последовательность операций при ковке диска с отверстием

**Штамповка** — обработка металлов давлением с помощью штампа, закрепленного в рабочем органе кузнечно-штамповочной машины или незакрепленного.

Штамповка делится на объемную и листовую.

По сравнению с ковкой штамповка имеет следующие преимущества:

- возможность получения поковок более сложной формы, с более высокой точностью, с лучшим качеством поверхности;
- больший коэффициент использования металла  $K_{им} = 0,6 \dots 0,9$ ;
- более высокая производительность.



Благодаря высокой производительности штамповка применяется в крупносерийном и массовом производстве.

**Объемная штамповка** — штамповка изделий или заготовок из сортового проката с обусловленным значительным перераспределением металла в поперечном сечении исходной заготовки. Этот вид штамповки заключается в принудительном заполнении металлом полости штампа и придании ему формы полости.

Объемная штамповка подразделяется на горячую (с подогревом исходной заготовки) и холодную.

**Листовая штамповка** — штамповка изделий или заготовок из листового или фасонного проката без обусловленного значительного перераспределения металла в поперечном сечении исходной заготовки. Листовая штамповка осуществляется в основном в холодном состоянии.

### 5.2.1. Горячая объемная штамповка

Исходная заготовка для объемной штамповки — это разделенный сортовой прокат или прессованный пруток.

Для объемной штамповки используются молоты, КГШП (кривошипные горячештамповочные прессы), гидравлические прессы, винтовые прессы, ГКМ (горизонтальноковочные машины).

Штамповки в зависимости от назначения изготавливаемых из них деталей подразделяют на группы по следующим параметрам:

- точность изготовления: нормальной и повышенной точности;
- группа стали: 1-я группа — углеродистые и легированные стали (содержание углерода до 0,45 %, легирующих элементов — до 2 %); 2-я группа — легированные стали с большим содержанием легирующих элементов;
- форма и конфигурация поверхности;
- степень сложности  $C = V_{шт} / V_{ф}$ , где  $V_{шт}$  — объем (масса) штамповки,  $V_{ф}$  — объем правильной геометрической фигуры (шар, цилиндр, параллелепипед, призма и др.), в которую вписывается поковка (рис. 5.14). Различают 4 степени сложности (C): 1)  $C1 > 0,63$ ; 2)  $0,32 < C2 \leq 0,63$ ; 3)  $0,16 < C3 \leq 0,32$ ; 4)  $C4 \leq 0,16$ .

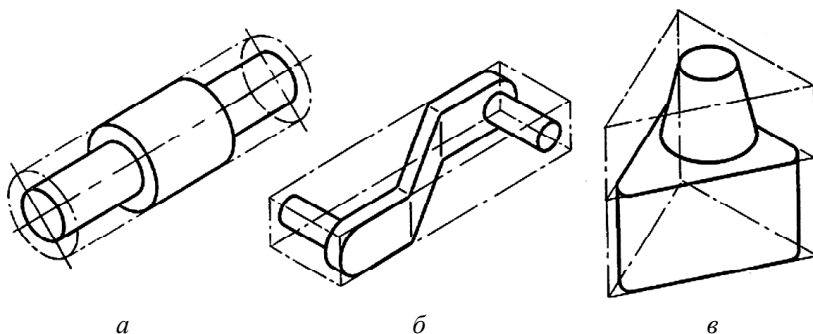


Рис. 5.14. Примеры штамповок и фигур, в которые они вписаны, для определения степени их сложности:

*а* — цилиндр; *б* — параллелепипед; *в* — призма

По форме штамповки классифицируются в зависимости от особенностей применяемого оборудования. Например, при штамповке на КГШП они подразделяются на следующие группы (рис. 5.15)<sup>4</sup>:

1-я — осесимметричные, круглые в плане и квадратные. Изготавливаются за 1—3 перехода осадкой в торец или осадкой с одновременным вдавливанием;

2-я — удлиненной формы с небольшой разницей в площадях поперечных сечений;

3-я — то же, со значительной разницей;

4-я — штамповки с изогнутой осью, используются гибочные ручьи;

5-я — изготавливаемые выдавливанием, которое может производиться в направлении оси штамповки, а также перпендикулярно.

Штамповку осуществляют в специализированных инструментах — штампах, которые разрабатываются для каждого вида штамповок. Различают две основных разновидности штампов:

1) открытые (рис. 5.16, *а*), предназначенные для штамповки всех видов поковок;

<sup>4</sup> Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / ред. совет: Е. И. Семенов [и др.]. М. : Машиностроение, 1985—1987. Т. 2. С. 179.

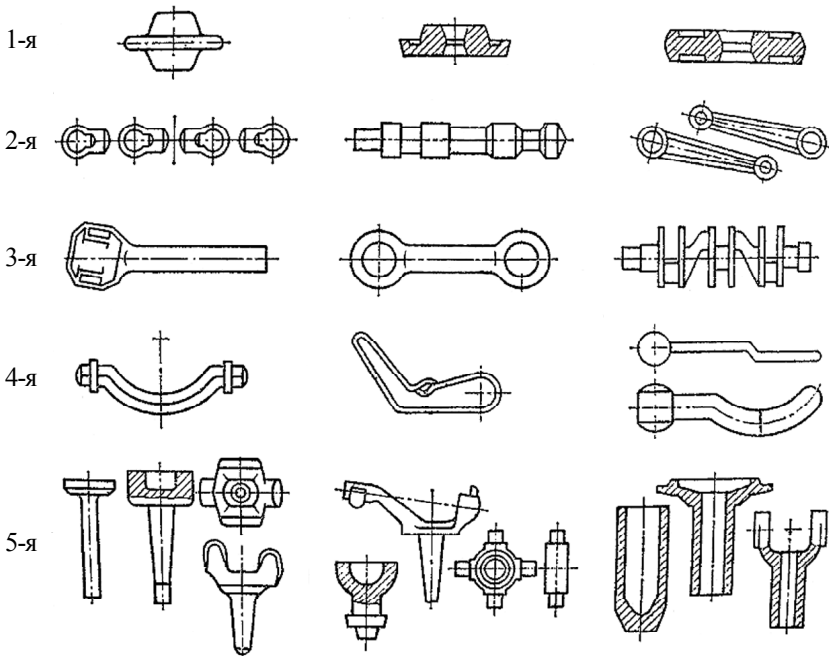


Рис. 5.15. Группы штамповок

• закрытые (рис. 5.16, б) — в основном для штамповки тел вращения (см. рис. 5.15, группа 1-я).

Открытые штампы характеризуются наличием заусенечной канавки (рис. 5.16, 3) по периметру ручья, в которую вытесняются избытки металла при штамповке и улучшается заполнение ручья, повышается точность. Штамповка в этом случае имеет заусенец (облой), который обрезается в обрезных штампах и может составлять 16—18 %. Поэтому штамповка в открытых штампах называется еще о б л о й н о й штамповкой.

При использовании закрытых штампов металл деформируется в замкнутой полости штампов без образования заусенца, поэтому такую штамповку называют б е з о б л о й н о й. В этом случае объем заготовки должен точно соответствовать объему полости штампов.

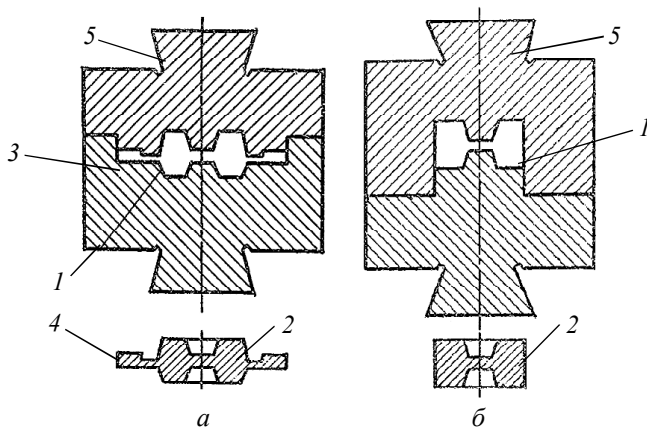


Рис. 5.16. Разновидности штампов:

*a* — открытые; *б* — закрытые;

*1* — ручей штампа; *2* — штамповка; *3* — заусенечная канавка; *4* — заусенец; *5* — хвостовики для крепления

К разновидности штамповки в закрытых штампах относят штамповку выдавливанием (рис. 5.17). Для этого заготовку устанавливают в полость штампа с выходным отверстием, в которое выдавливается часть металла с помощью пуансона. Штамповка в этом случае состоит из корпуса и стержневой части. Такой процесс штамповки аналогичен прессованию.

Так же производят прошивку в штампах, при которой в заготовку, помещенную в закрытый штамп, вдавливают пуансон для получения штамповки с полостями различной формы.

Разработка технологии штамповки включает следующие этапы.

1. Конструирование штамповки, разработка ее чертежа, расчет ее объема и массы.
2. Определение способа штамповки (вдоль или перпендикулярно оси заготовки), группы штамповки по классификации.
3. Выбор переходов штамповки.
4. Определение массы, формы и размеров заготовки.
5. Разработка конструкции и чертежа ручья штампа.
6. Выбор типа молота и массы его падающих частей, либо прессы.
7. Составление технологической карты штамповки.

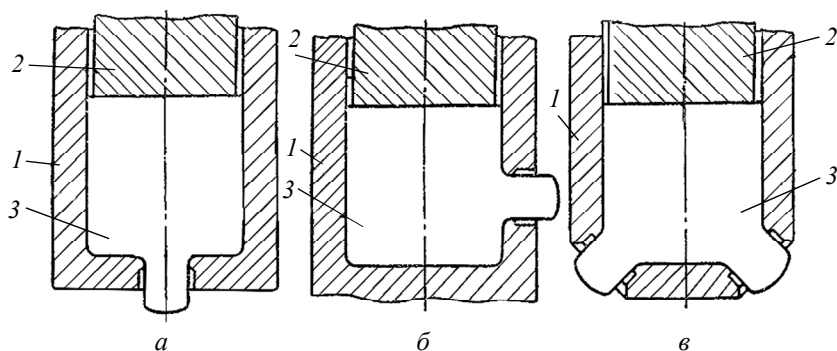


Рис. 5.17. Штамповка выдавливанием:

*a* — вдоль оси; *б* — поперек оси; *в* — под углом;  
 1 — штамп, 2 — пуансон, 3 — штамповка

Основное отличие разработки технологического процесса штамповки отковки состоит в том, что разрабатывается конструкция и чертеж специализированного инструмента — штампа (этап 5), в то время как при ковке используется универсальный инструмент.

Рассмотрим некоторые особенности разработки технологии.

На первом этапе по чертежу детали разрабатывается чертеж штамповки в соответствии ГОСТом 7505—89 аналогично разработке чертежа поковки. В связи с тем, что штамповкой изготавливаются детали более сложной формы, чертеж штамповки обычно сложнее чертежа поковки и учитывает специфические напуски: штамповочные уклоны для извлечения поковки из штампа, радиусы закруглений и перемычки отверстий. Назначение припусков и допусков аналогично ковке производится по таблицам ГОСТа 7505—89 в зависимости от класса точности, группы стали, степени сложности и конфигурации поверхности разъема штампа (плоская, симметрично изогнутая, несимметрично изогнутая). Пример чертежа штамповки приведен на рис. 5.18, где тонкими линиями показан контур детали. Например, наружный диаметр штамповки увеличен со 127,8 мм до 136,5 мм с учетом припусков и штамповочных уклонов, а допуски на неточность штамповки составляют +2,1...–1,1 мм.

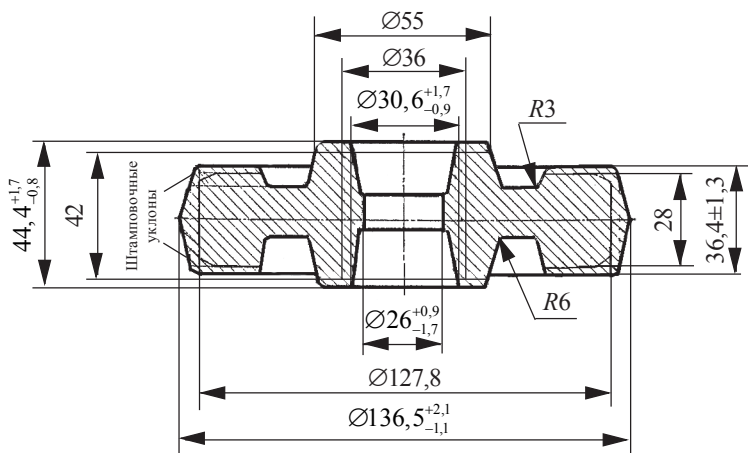


Рис. 5.18. Чертеж штамповки шестерни (основные размеры)

Далее по чертежу рассчитывается объем и масса штамповки.

На втором этапе определяется способ штамповки исходя из классификации штамповок. Так, штамповки 1-й и 5-й групп (рис. 5.15) штампуются вдоль оси, а штамповки 2—4-й групп — поперек оси, что учитывается в дальнейшем при конструировании штампа.

Выбор переходов штамповки и конструирование штампов представляет собой довольно сложную процедуру и рассматривается в специальных курсах. Штамповки сложных конфигураций получают за несколько переходов, которым соответствуют определенные ручки штампов. Последние подразделяются на следующие виды:

1) заготовительные:

- протяжные (удлиняют заготовку);
- подкатные (увеличивают площадь поперечного сечения в одних местах за счет других);
- гибочные;
- пережимные (создают местные уширения);
- формовочные (придают заготовке форму, близкую к форме штамповки в плане);
- высадочные (для фланца простой формы);

2) окончательные:

— черновые (получают форму, близкую к окончательной);

— чистовые (получают окончательную, отчетливо оформленную поковку по чертежу);

3) обрезные (удаляют заусенцы, перемычки отверстий или отделяют одну штамповку от другой).

Для примера рассмотрим переходы при штамповке шатуна (рис. 5.19). Штамповку осуществляют в 4 ручьях, выполненных в одном штампе. Мерную заготовку длиной  $L_0$  и диаметром  $D_0$  (см. рис. 5.19, а) отрезают, нагревают и штампуют последовательно в протяжном (1), подкатном (2), черновом (3) и чистовом (4) ручьях (см. рис. 5.19, б). На заключительной стадии производится обрезка заусенца и прошивка двух отверстий.

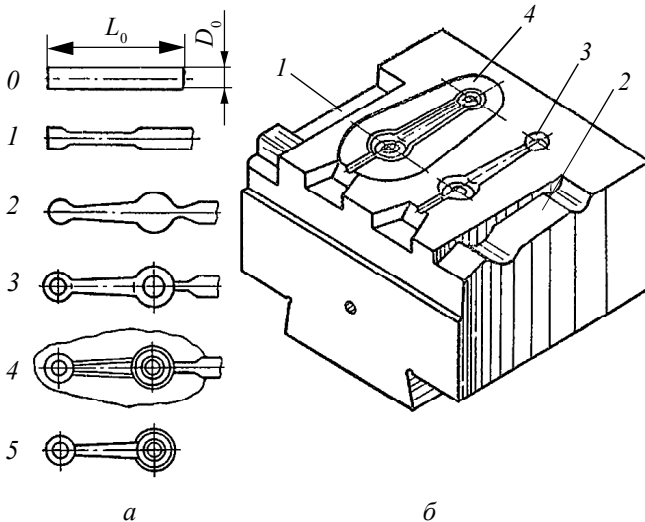


Рис. 5.19. Переходы при штамповке шатуна (а)  
и четырехручьевого открытого штампа (б):

0 — исходная заготовка; 1 — протяжной ручей; 2 — подкатной ручей; 3 — черновой; 4 — чистовой ручьи; 5 — готовая штамповка

Объем заготовки при штамповке в открытом штампе определяют с учетом угара:

$$V_0 = (V_{\text{шт}} + V_3) \frac{100 + \delta}{100}, \quad (5.3)$$

где  $V_{\text{шт}}$  — объем штамповки по чертежу;  $V_3$  — объем заусенца (облоя);  $\delta$  (%) — величина угара.

В случае применения закрытой штамповки, где облой не образуется, в этой формуле  $V_3 = 0$ .

Массу падающих частей молота определяют на основе производственного опыта по эмпирическим формулам, которые учитывают удельную работу на один квадратный метр штамповки, площадь ее поверхности, высоту падения бабы молота, механические свойства стали и т. п. Для выбора прессы рассчитывают потребное усилие штамповки по формулам, приведенным в литературе<sup>5</sup>.

На заключительном этапе составляют технологическую карту штамповки, которая включает следующие сведения: номер цеха, марку стали или сплава, вид и размеры исходной заготовки (например, прокат диаметром 100 мм и длиной 6 м), наименование, содержание и режимы операций, оборудование, основной инструмент (бойки, штампы, ножи и др.), измерительный инструмент, объемы партии (масса, число поковок), сведения о расходе материала (поковка, угар, облой, выдра и др.).

Например, при штамповке на молотах выполняются следующие технологические операции:

- 1) технический контроль исходного проката, штанг;
- 2) транспортировка на разрезку, разрезка на мерные длины;
- 3) нагрев заготовок в нагревательной печи;
- 4) объемная штамповка: в заготовительных и окончательном ручьях;
- 5) обрезка заусенца на обрезном прессе;
- 6) при необходимости — термическая обработка;

---

<sup>5</sup> См.: *Охрименко Я. М.* Технология кузнечно-штамповочного производства... С. 466—469.



- 7) очистка от окалины;
- 8) правка, калибровка в чеканочном штампе;
- 9) маркировка, технический контроль.

### 5.2.2. Холодная объемная штамповка

По сравнению с горячей холодная объемная штамповка имеет следующие **п р е и м у щ е с т в а**:

- более высокие точность изделий и механические свойства за счет упрочнения при холодной деформации;
- отсутствие потерь металла в угар, возможность изготовления деталей без последующей механической обработки, больший коэффициент использования металла ( $K_{\text{им}} = 0,9 \dots 0,93$ );
- более высокая производительность за счет механизации и автоматизации производства, применения многопозиционных штамповочных аппаратов при крупносерийном и массовом производстве.

Довольно широкая область применения холодной штамповки — изготовление гвоздей, метизов и другого крепежа.

Исходная заготовка для этого вида штамповки — прутки и проволока, используемая в штамповочном аппарате в виде мотка.

Изделия, получаемые холодной штамповкой, подразделяются на две категории:

1) детали стержневого типа (табл. 5.1): с головкой простой и сложной формы, с головкой на обоих концах, ступенчатый стержень, с коническим элементом и др.

2) детали осесимметричные полые (табл. 5.2): гладкие, с отростком в полости, с перемычкой и др.

Различают три группы операций холодной объемной штамповки:































- 1) осадка, высадка, чеканка;
- 2) редуцирование, прямое выдавливание;
- 3) обратное, радиальное и комбинированное выдавливание, вытяжка с утонением стенки.

На рис. 5.20 представлены для примера следующие операции перечисленных групп.



Таблица 5.2

Классификация осесимметричных деталей

Гладкие	Со ступенчатой полостью	С отрезком полостью	С перемычкой	С наружным отрезком	С полым отрезком	С фланцем в верхней части	С фланцем в нижней части	С фланцем в средней части	С утолщением у закрытого торца
									
									
									

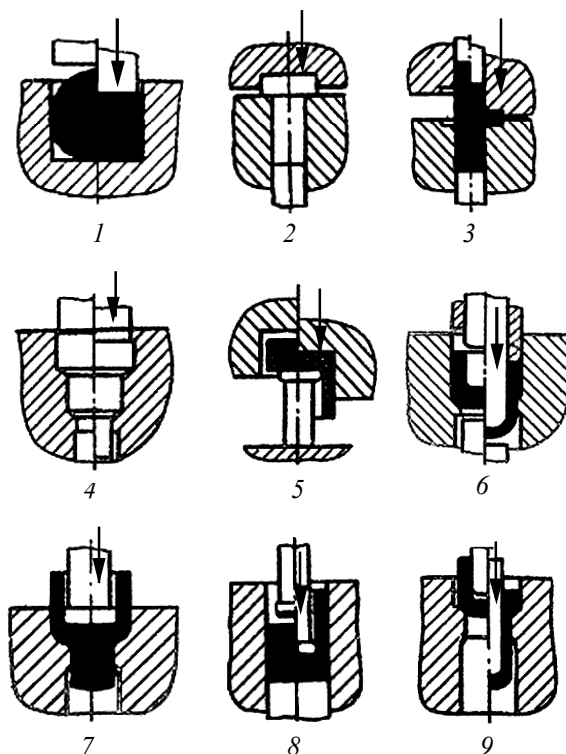


Рис. 5.20. Операции холодной объемной штамповки

— калибровка расплющиванием (рис. 5.20, 1) — получение заготовок с малыми допусками на размеры поперечного сечения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях;

— закрытая высадка в матрице (рис. 5.20, 2);

— открытая или закрытая высадка (рис. 5.20, 3) в полости пуансона и матрицы (образование утолщений в средней части детали);

— прямое выдавливание цилиндрического стержня (редуцирование по диаметру, рис. 5.20, 4);

— прямое выдавливание полый детали (рис. 5.20, 5);

— то же с натяжением с помощью пуансона (рис. 5.20, 6);

— двухстороннее (комбинированное) выдавливание (рис. 5.20, 7);  
— обратное выдавливание цилиндрического стакана (рис. 5.20, 8);  
— вытяжка с утонением стенок цилиндрического стакана (рис. 5.20, 9).

В промышленности применяют две основные технологические схемы холодной штамповки. Процесс производства деталей по первой схеме состоит из четырех основных этапов:

- 1) разделка проката на мерные длины;
- 2) разупрочняющая термическая обработка заготовок;
- 3) подготовка поверхности заготовок (удаление дефектов и загрязнений, нанесение подсмазочного покрытия и смазки);
- 4) штамповка, как правило, на одно- или многопозиционных вертикальных прессах.

Производство деталей по второй схеме проводится на одно- или многопозиционных аппаратах, на которых прокат подвергается правке и разрезке. Этапы 2—4 выполняется в той же последовательности.

В качестве примера рассмотрим переходы при четырехпозиционной штамповке болта из цилиндрического стержня (рис. 5.21).

На первой и второй позиции производится редуцирование по диаметру путем прямого выдавливания (см. рис. 5.20, 4). На третьей позиции — высадка головки болта (см. рис. 5.20, 2), и на четвертой позиции — обрезка по контуру наружного шестигранника.

### 5.2.3. Листовая штамповка

Основная особенность листовой штамповки заключается в том, что в качестве исходной заготовки применяется листовый материал: лист шириной 700—2000 мм и длиной 1400—5000 мм; полоса шириной до 200 мм и длиной до 2 м; лента в рулонах шириной до 2,3 м.

В зависимости от толщины заготовки различают тонколистовую ( $h \leq 4$  мм) и толстолистовую штамповку. В основном она осуществляется в холодном состоянии, однако заготовки толщиной более 15—20 мм штампуют в горячем состоянии.

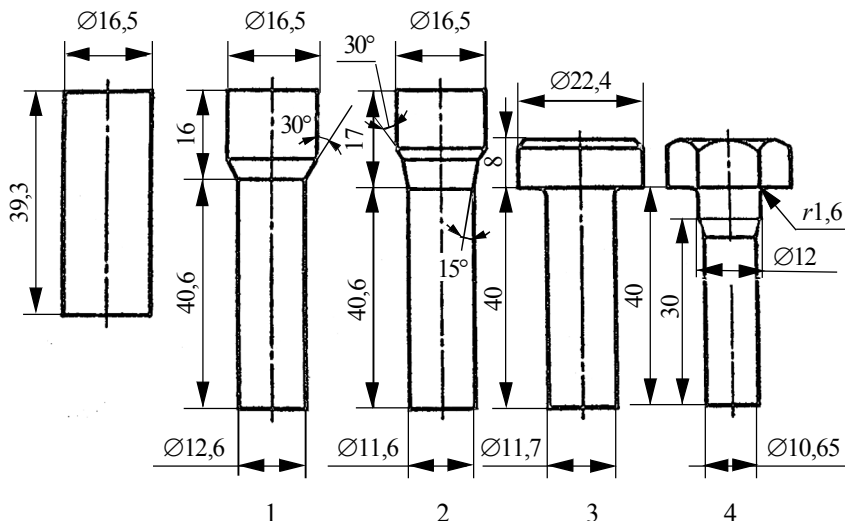


Рис 5.21. Переходы при штамповке болта

Диапазон габаритных размеров изделий довольно широк: от нескольких мм до 6—7 м, толщина стенки — от 0,1 мм до 100 мм и более.

Листовая штамповка осуществляется в основном на кривошипных прессах простого и двойного действия, применяются также автоматы (многопозиционные кривошипные прессы) и гидравлические прессы (для глубокой вытяжки и для штамповки крупнобаритных деталей).

В соответствии с ГОСТом 18970—84 операции листовой штамповки подразделяются на разделительные (рис. 5.22) и формоизменяющие (рис. 5.23).

Рассмотрим сущность разделительных операций по рис. 5.22.

О т р е з к а — полное отделение части заготовки по незамкнутому контуру путем сдвига (рис. 5.22, *a*).

**Р а з р е з к а** — разделение заготовки на части по незамкнутому контуру путем сдвига (с отходом — справа и без отхода — слева, см. рис. 5.22, б).

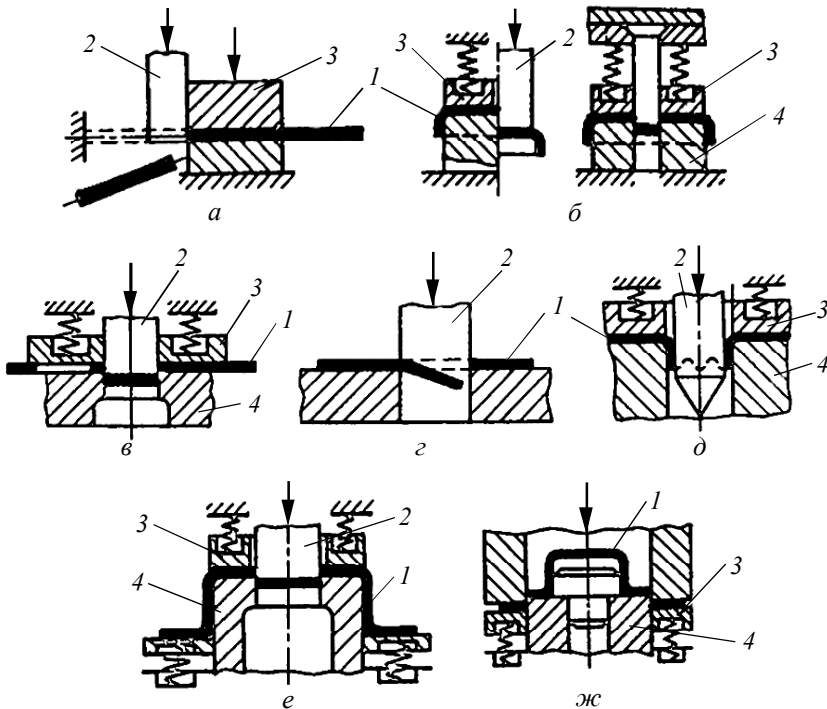


Рис. 5.22. Разделительные операции листовой штамповки:

*а* — отрезка, *б* — разрезка, *в* — вырубка, *г* — надрезка, *д* — проколка, *е* — пробивка, *жс* — обрезка;

1 — заготовка, 2 — пуансон (нож), 3 — прижим, 4 — матрица

**В ы р у б к а** — полное отделение заготовки или изделия от исходной заготовки по замкнутому контуру путем сдвига (рис. 5.22, *в*).

**Н а д р е з к а** — неполное отделение части заготовки путем сдвига (рис. 5.22, *г*).

**П р о к о л к а** — образование в заготовке отверстия без удаления металла в отход (рис. 5.22, *д*).

**П р о б и в к а** — образование отверстия или паза путем сдвига с удалением отделенной части металла в отход (рис. 5.22, *е*).

**О б р е з к а** — удаление излишков металла (припусков, облоя) путем сдвига (рис. 5.22, *жс*).

Схемы формоизменяющих операций представлены на рис. 5.23.

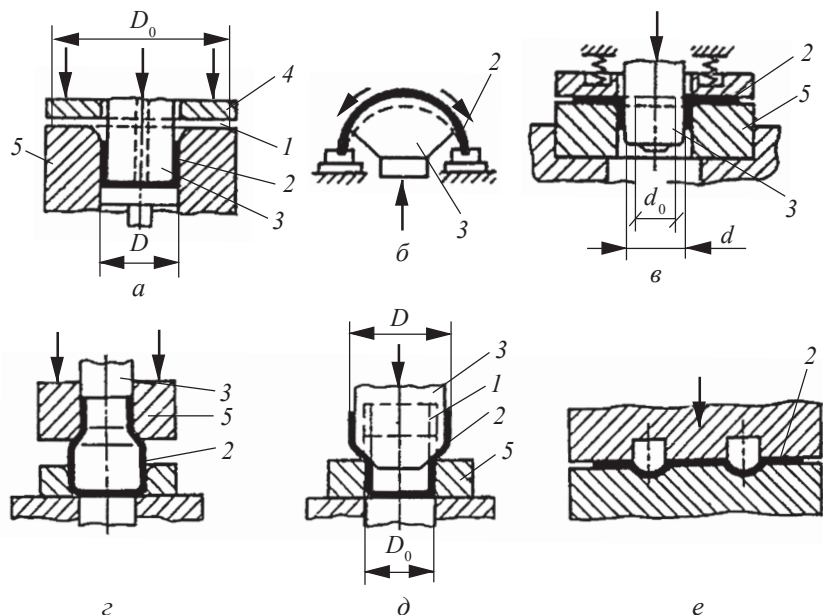


Рис. 5.23. Формоизменяющие операции листовой штамповки:

*a* — вытяжка; *б* — обтяжка; *в* — отбортовка; *г* — обжим в штампе; *д* — раздача;  
*е* — рельефная формовка;  
*1* — исходная заготовка; *2* — изделие; *3* — пуансон; *4* — прижим; *5* — матрица

Формоизменяющие операции проводятся в специальных штампах, состоящих из матрицы, пуансона, прижима и нижнего упора (см. рис. 5.23). ГОСТ 18970—84 дает следующие определения формоизменяющих операций.

**В ы т я ж к а** (рис. 5.23, *a*) — образование полрой заготовки или изделия из плоской или полрой исходной заготовки с утонением или без утонения стенки. Коэффициент вытяжки определяется как отношение диаметра плоской исходной заготовки к диаметру после вытяжки:  $\mu = D_0/D$ . Его величина обычно  $\mu = 1,2—2$ .

**О б т я ж к а** (рис. 5.23, *б*) — образование заготовки заданной формы приложением растягивающих усилий к ее краям.



**Отбортовка** (рис. 5.23, в) — образование борта по внутреннему контуру заготовки с одновременным увеличением диаметра отверстия. Величина отбортовки оценивается коэффициентом  $K_{отб} = d/d_0$ , где  $d$  и  $d_0$  — соответственно диаметры отверстия после и до отбортовки. Его величина зависит от пластичности материала и относительной тонкостенности  $s/d$  и может достигать 2,7 для тонкостенных деталей. Обычно  $K_{отб} = 1,2 \dots 2$ .

**Обжим в штампе** (рис. 5.23, з) — уменьшение размеров поперечного сечения части полой заготовки.

**Раздача** (рис. 5.23, д) — увеличение размеров поперечного сечения части полой заготовки. В случае круглого поперечного сечения величина раздачи оценивается коэффициентом  $K_p = D/D_0$ , где  $D$  и  $D_0$  — соответственно диаметры заготовки после и до раздачи. Обычно предельный коэффициент раздачи  $K_p$  не превышает 1,3—1,5.

**Рельефная формовка** (рис. 5.23, е) — образование рельефа за счет местных растяжений без обусловленного изменения толщины стенки.

**Гибка** — образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы.

Применение операций холодной штамповки рассмотрим на примере изготовления колеса (рис. 5.24).

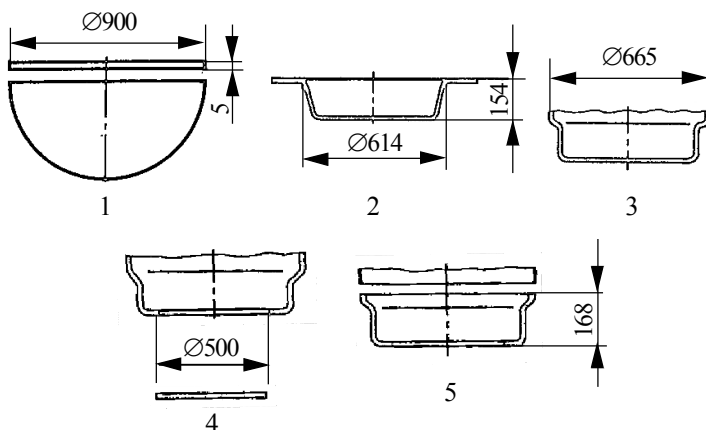


Рис. 5.24. Переходы при штамповке колеса

В этом случае операции выполняются в следующей последовательности, указанной на рисунке:

- 1) вырубка круглой исходной заготовки диаметром 900 мм;
- 2) вытяжка на глубину 154 мм;
- 3) формовка края;
- 4) пробивка отверстия в дне диаметром 500 мм;
- 5) обрезка неровного края.

## 6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАНИЯ

### 6.1. Общие понятия

**Прессование (экструзия)** — это выдавливание металла из замкнутого объема (контейнера) через канал матрицы.

Прессованием получают в основном длинномерные изделия необходимого профиля за счет применения калиброванных матриц. Основная особенность этого процесса — благоприятная схема напряженного состояния в виде всестороннего сжатия (см. рис. 2.2, б), что обуславливает его преимущества.

**Преимущества прессования:**

- большое разнообразие поперечных сечений прессуемых изделий;
- простота способа, малоцикличность (чаще всего изделие получают за одну операцию);
- большие коэффициенты вытяжки  $\mu = 4—60$  (до 1000) возможность деформировать малопластичные металлы и сплавы;
- возможность использовать порошковые и композитные материалы;
- высокая точность профиля при выдавливании через формообразующую матрицу;
- высокая мобильность процесса, простота перехода на другой типоразмер (замена матрицы);
- отсутствие динамических нагрузок на оборудование и инструмент.

**Недостатки прессования:**

- специфические дефекты: утяжины, трещины, задиры и др.; неравномерность (анизотропия) свойств изделий;

- наличие пресс-остатка, малый коэффициент использования металла;
- малая производительность прессовых установок;
- низкая стойкость инструмента из-за больших давлений со стороны металла.

Для прессования используют следующие исходных заготовки:

- слитки, литые в изложницы, с конусностью 5—7 мм на 1 м длины; слитки полунепрерывного литья (для тяжелых цветных металлов);
- НЛЗ из алюминиевых и магниевых сплавов;
- цилиндрические катаные заготовки;
- сверленные цилиндрические заготовки для полых изделий (труб);
- плоские заготовки (слитки) для панелей.

С о р т а м е н т прессуемой продукции разделяется на полуфабрикаты и десятки тысяч наименований готовых профилей.

Прессованию подвергаются разнообразные материалы: стали, цветные металлы и сплавы: особенно широко — алюминиевые, а также медные, титановые сплавы, магний и его сплавы, тугоплавкие и жаропрочные металлы и сплавы. Фактически любой материал можно обработать прессованием.

#### К л а с с и ф и к а ц и я п р е с с - и з д е л и й

1. Сплошные и полые: прутки (круглые, 6-гранные, 4-угольные и др.) и профили (уголок, тавр, двутавр, Z-образный и др.) — с п л о ш н ы е; одноканальные (с различной формой канала) и многоканальные (рис. 6.1) — п о л ы е.

2. Панели (полосы) – тонкостенные профили, поперечное сечение которых вписывается в прямоугольник (рис. 6.2)<sup>1</sup>. Панели прессуются из круглых, плоских и плоско-овальных контейнеров.

3. Трубы: постоянного сечения по длине (круглые, каплевидные, прямоугольные, квадратные, шестиугольные, звездообразные, ребристые и др.); переменного сечения (рис. 6.3).

---

<sup>1</sup> См. об этом: Обработка металлов давлением / Ю. Ф. Шевакин, В. Н. Чернышев, Р. Л. Шаталов, Н. А. Мочалов. М. : Интермет Инжиниринг, 2005. 496 с.

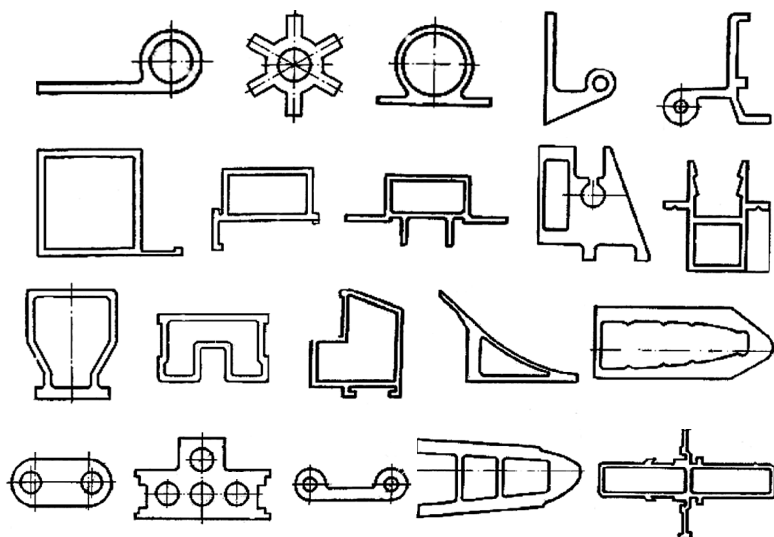


Рис. 6.1. Полые профили, прессуемые через комбинированную матрицу

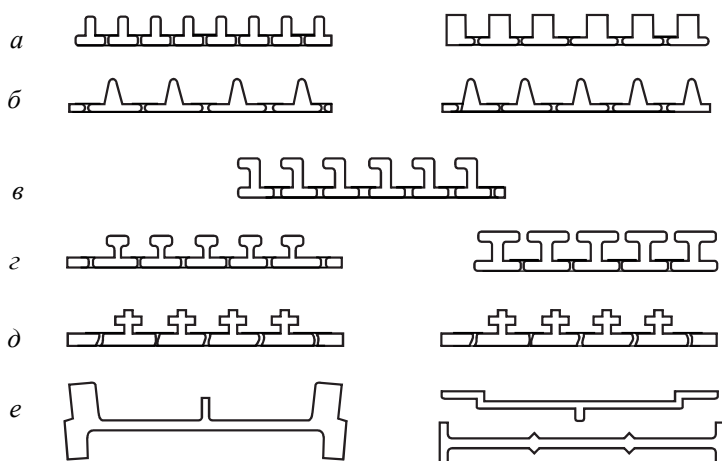


Рис. 6.2. Панели, прессуемые из плоского контейнера, с различной формой ребер:

*a* — прямоугольные; *б* — треугольные; *в* — Г-образные; *г* — Т-образные; *д* — крестообразные; *е* — произвольные

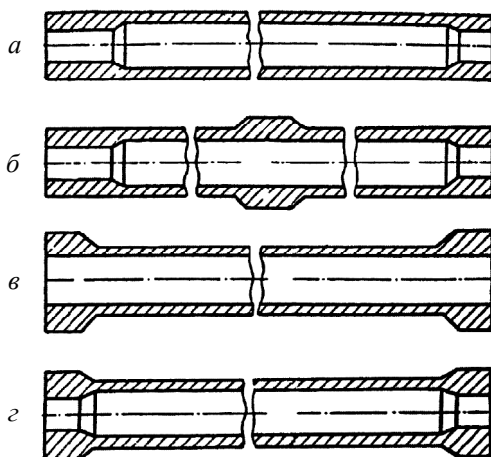


Рис. 6.3. Трубы переменного сечения:

*а* — с внутренними концевыми утолщениями; *б* — с концевыми и наружными утолщениями; *в* — с наружными концевыми утолщениями; *г* — с двухсторонними утолщениями

### Использование пресс-изделий

- **Транспорт:** чаще используются профили из алюминиевых сплавов — кузова железнодорожных вагонов и метро, кузова автомобилей и автобусов, рамы окон автомобилей, обшивка блоков фюзеляжей самолетов, яхты, несущие конструкции корпусов судов, многокамерные профили для днищ рыболовных судов для пропуска хладагента и т. п.

- **Машиностроение и приборостроение:** подвижные элементы станков, корпуса электродвигателей с ребрами, высокопроизводительные ячеистые охлаждающие элементы; проволока, прутки из медных сплавов для токоведущих элементов и штамповки крепежных деталей; ребристые трубы для теплообменных аппаратов, трубы из титановых сплавов для перекачки агрессивных сред в химическом аппаратостроении, теплообменниках, автоклавных системах; трубы из жаропрочных никелевых сплавов для химической промышленности, турбиностроения, судостроения, пищевой промышленности и т. п.

- Ракето- и самолетостроение: турбинные лопатки реактивных двигателей, элементы шасси самолетов из титановых сплавов, трубы из жаропрочных никелевых и высоколегированных сплавов и др.

- Строительство: двери, окна, фасады высотных зданий, кровли, перегородки, входные зоны из алюминиевых сплавов; трубы из коррозионно-стойких латуней (легированных алюминием или оловом) для электростанций и установок, контактирующих с морской водой (обессоливающие установки), и др.

- Инженерные сооружения: лестницы, трапы самолетов, посадочные площадки на воде для вертолетов и т. п.

- Бытовая техника: мебельная фурнитура из медных сплавов, трубы из медных сплавов для водопроводов, корпуса деталей часов из титановых сплавов и др.

- Медицина: титановые сплавы для прессования элементов оправ очков, имплантов, хирургических инструментов и др.

## 6.2. Разновидности прессования

Традиционные процессы прессования классифицируют по следующим основным признакам:

- 1) по направлению истечения металла — прямое и обратное;
- 2) по температуре обрабатываемого металла — холодное и горячее;
- 3) по наличию внутреннего канала — сплошных профилей и полых с применением иглы (для труб) и матриц со сварочными камерами;
- 4) по использованию смазки — со смазкой и без смазки.

Также известны усовершенствованные процессы:

- 1) гидропрессование;
- 2) с активным действием сил трения;
- 3) полунепрерывное и непрерывное;
- 4) метод Conform и др.

Рассмотрим сущность перечисленных способов прессования.

При прямом прессовании (рис. 6.4)<sup>2</sup> направление действия силы прессования  $P$  совпадает с направлением течения металла со скоростью  $v$ .

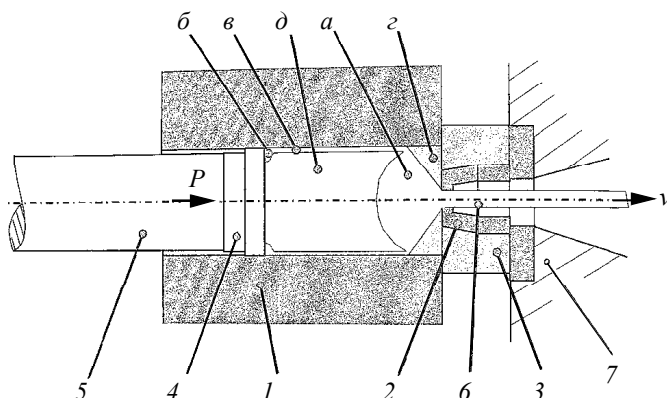


Рис. 6.4. Схема прямого прессования:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — матрицедержатель; 4 — пресс-шайба; 5 — пресс-штемпель; 6 — пруток; 7 — передняя поперечина пресса;  
 $a$  — первичная зона пластической деформации;  $b$  — вторичная зона деформации;  
 $v$  — подверженная влиянию трения поверхностная зона;  $г$  — «мертвая» зона;  
 $д$  — недеформируемая зона;  $P$  — сила прессования;  $v$  — скорость течения металла

При этом металл движется относительно неподвижного контейнера, возникают напряжения трения в приконтактном слое  $v$ , что приводит к росту силы прессования. На рис. 6.4 показана схема волочения через плоскую матрицу, что допустимо при прессовании пластичных (например, алюминиевых) сплавов. При этом возникает воронкообразная «мертвая» зона  $г$ , которая выполняет функции входного конуса матрицы, а пластическая деформация сосредоточена только в области  $a$ . Высота пресс-остатка в конце прессования составляет примерно  $1/6$  диаметра контейнера<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> См.: Прессование : справочное руководство : пер. с нем. / М. Баузер, Г. Зауер, К. Зигерт. М. : АЛЮСИЛ МВнТ, 2009. С. 93.

<sup>3</sup> Подробнее см.: Там же. С. 94.



Прямое прессование прутков может осуществляться в холодном состоянии со смазкой, в горячем состоянии со смазкой и без смазки с «рубашкой» и без «рубашки».

Рассмотрим операции прессования прутка в горячем состоянии без смазки с «рубашкой» (рис. 6.5), например прессование медных сплавов. «Рубашка» — это отслоя из загрязненных и окисленных наружных слоев осажденной в контейнере заготовки, который после прессования остается на стенках контейнера и должен быть удален. Для образования «рубашки» между контейнером и пресс-шайбой создают зазор 2—3 мм. Преимущества прессования с «рубашкой» заключаются в том, что загрязненные и окисленные наружные слои не попадают в готовое изделие, а удаляются. Технологический процесс прессования (см. рис. 6.5) содержит операцию отделения «рубашки» с помощью очистного диска, для чего после прессования контейнер отводится назад, чтобы обеспечить использование втулки для отделенной рубашки и инструментов между матрицей и контейнером (во втулке оказываются очистной диск, рубашка, пресс-шайба и пресс-остаток). Прессование в этом случае включает стадии, указанные на рис. 6.5.

Прямое прессование стальных прутков осуществляется в горячем состоянии со смазкой. В качестве смазки используется стекло, для этого в исходном состоянии между передним торцом заготовки и дном контейнера помещается стеклянный диск. В процессе прессования стекло размягчается и обеспечивает хорошее смазывающее и одновременно изолирующее действие (сохранение тепла заготовки).

Так как в этом способе прессования поверхность прутка образуется из наружных зон заготовки, ее подвергают обточке или другой поверхностной обработке для удаления поверхностных дефектов.

Прямое прессование прутков в холодном состоянии из пластичных сплавов (например, алюминия) осуществляется через коническую матрицу со смазкой (рис. 6.6). Для облегчения прессования торец заготовки обтачивают на конус. Прессование включает стадии, указанные на рис. 6.6.

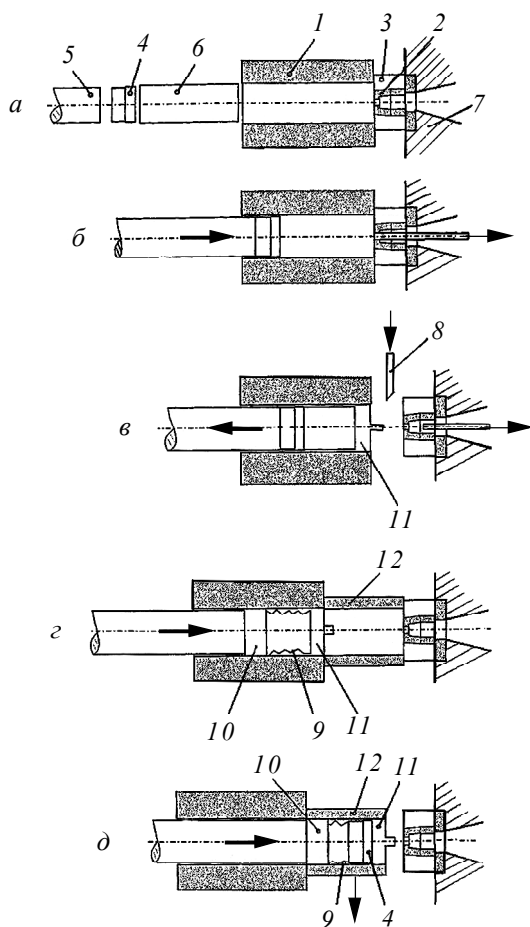


Рис. 6.5. Стадии прессования (*a—д*) прутка с «рубашкой»:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — матрицедержатель; 4 — пресс-шайба; 5 — пресс-штемпель; 6 — заготовка; 7 — передняя поперечина пресса; 8 — пила; 9 — «рубашка»; 10 — очистной диск; 11 — пресс-остаток; 12 — втулка приспособления для удаления «рубашки» и инструмента;

*a* — исходная позиция; *б* — распрессовка и прессование до достижения заданной величины пресс-остатка; *в* — отвод контейнера, отрезка прутка и введение очистного диска для удаления рубашки (слева); *г* — выталкивание из контейнера очистного диска, рубашки, пресс-шайбы и пресс-остатка в специальную втулку; *д* — вывод втулки приспособления с содержимым, возврат в исходную позицию

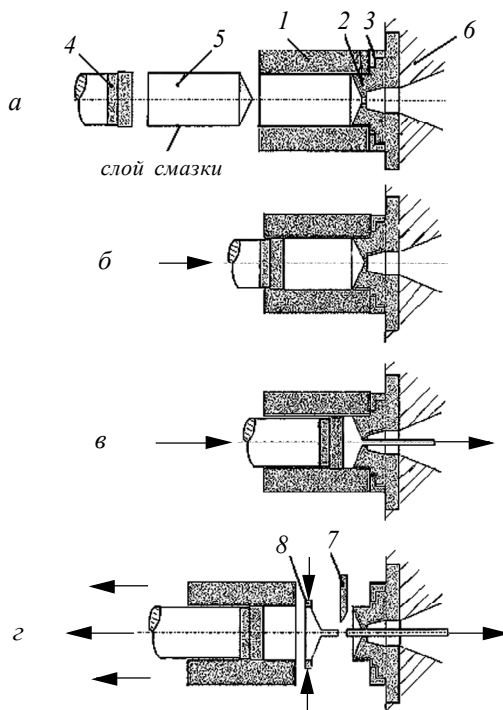


Рис. 6.6. Стадии прессования (а—г) прутка  
в холодном состоянии со смазкой:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — матрицедержатель; 4 — пресс-штемпель с прикрепленной к нему пресс-шайбой; 5 — исходная заготовка с коническим торцом;

6 — передняя поперечина пресса; 7 — нож; 8 — манипулятор;

а — исходная позиция; б — распрессовка заготовки в контейнере; в — прессование до достижения заданной величины пресс-остатка; г — отвод контейнера и пресс-штемпеля, удаление пресс-остатка с помощью пилы и манипулятора, отрезка пресс-изделия

При обратном прессовании (рис. 6.7)<sup>4</sup> направление действия силы прессования  $P$  противоположно направлению течения металла со скоростью  $v$ . В этом способе практически от-

<sup>4</sup>См.: Прессование... С. 162.

сутствует скольжение металла по контейнеру, поэтому сила прессования значительно меньше. Для обеспечения движения металла против направления приложения силы прессования  $P$  пресс-штемпель выполняют пустотелым.

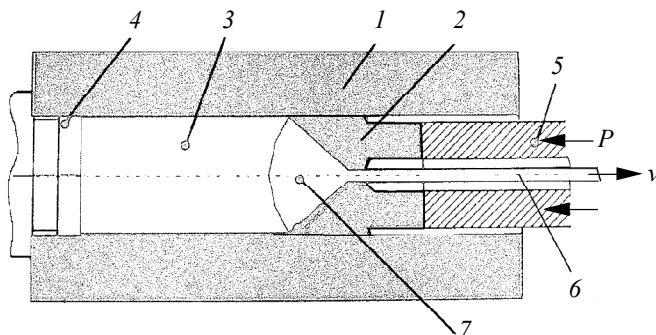


Рис. 6.7. Схема обратного прессования прутка:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — заготовка; 4 — затворный пресс-штемпель; 5 — пустотелый матричный пресс-штемпель; 6 — пруток; 7 — зона пластической деформации

Обратное прессование имеет следующие п р е и м у щ е с т в а перед прямым:

- меньшее усилие прессования, возможность снижения температуры заготовки (при горячем прессовании) и увеличения коэффициента вытяжки;

- более высокое качество изделий;

- более высокая производительность процесса;

- меньшая неравномерность деформации по сечению и большая скорость прессования;

- больший выход годного за счет уменьшения длины прессостатка до 1/10 от диаметра контейнера;

- увеличение срока службы контейнера из-за отсутствия подвижного контакта с заготовкой.

Обратное прессование применяется для производства проволоки, прутков и профилей чаще всего из алюминия, его сплавов,

а также латуни, в том числе труднодеформируемой. Для прессования сталей обратное прессование, как правило, не применяется<sup>5</sup>.

Известны следующие разновидности обратного прессования прутков:

- в горячем состоянии без смазки без «рубашки»;
- в горячем состоянии без смазки с «рубашкой»;
- в холодном состоянии без смазки и без «рубашки»;
- в холодном состоянии со смазкой без «рубашки» (см. рис. 6.7).

В последнем случае в контейнер задается покрытая смазкой заостренная заготовка, а прессование (например, алюминия) осуществляется через коническую матрицу.

Для прессования труб используется дополнительный инструмент — игла (оправка). Исходная заготовка может быть сплошной (тогда прессованию предшествует прошивка заготовки) и с просверленным отверстием. Во время прессования необходимо преодолеть силы трения на контакте иглы с заготовкой, поэтому сила прессования возрастает по сравнению с прессованием прутков.

Прямое прессование труб может осуществляться в следующих вариантах:

- 1) в горячем состоянии с неподвижной и подвижной иглой;
- 2) в холодном состоянии с неподвижной иглой.

На рис. 6.8<sup>6</sup> изображена схема горячего прессования трубы из предварительно просверленной заготовки из алюминиевого сплава с неподвижной иглой. Диаметр отверстия заготовки, как правило, немного меньше диаметра иглы, которая имеет заостренный конец. Для расширения отверстия применяется экспандирование.

Отверстие в заготовке обеспечивает направленное движение иглы; пресс-штемпель, внутри которого расположена игла, выполняется пустотелым. После достижения заданной длины пресс-остатка игла, пресс-штемпель и контейнер отводятся назад, чтобы отделить пресс-остаток ножницами.

---

<sup>5</sup> Подробнее см.: Прессование... С. 140.

<sup>6</sup> Там же... С. 198.

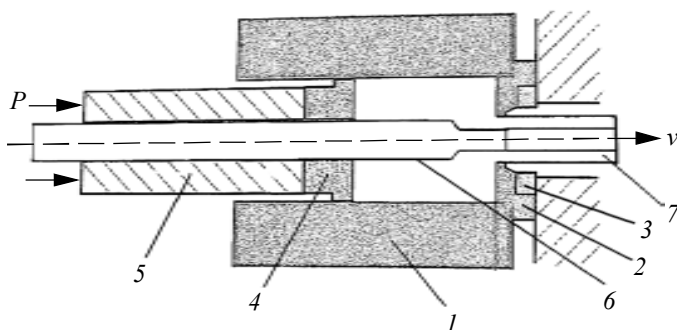


Рис. 6.8. Схема прямого прессования труб с неподвижной иглой:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — матрицедержатель; 4 — пресс-шайба; 5 — пресс-штемпель; 6 — игла; 7 — труба

В другом варианте процесса подвижная игла не имеет заостренного конца и может двигаться со скоростью пресс-штемпеля, будучи закрепленной в нем, за счет чего снижаются силы трения и сила прессования. Также игла может двигаться быстрее пресс-штемпеля, способствуя движению металла.

Обратное прессование труб осуществляется в горячем состоянии в следующих вариантах:

- с неподвижной иглой со смазкой и без смазки иглы;
- с подвижной иглой со смазкой и без смазки иглы.

На рис. 6.9 изображена схема одного из вариантов процесса обратного горячего прессования трубы без смазки с неподвижной иглой (например, алюминиевого сплава).

При гидростатическом прессовании (рис. 6.10)<sup>7</sup> металл выдавливается из контейнера не с помощью пунсона, а жидкостью высокого давления. Процесс осуществляется главным образом в холодном состоянии, горячее прессование применяется для прессования труднодеформируемых сталей и сплавов. В качестве гидростатической среды чаще всего используется рициновое (касторовое) масло, хотя известно использование твердых

<sup>7</sup> См.: Прессование... С. 168.

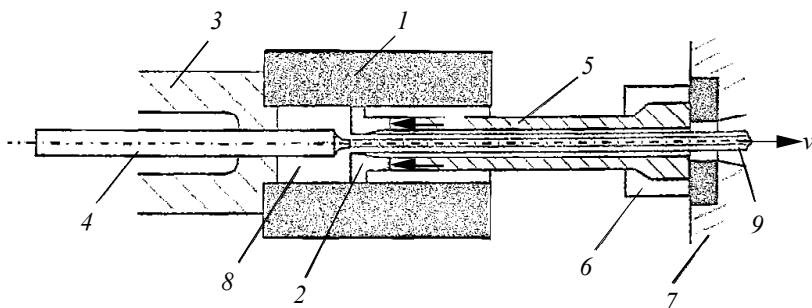


Рис. 6.9. Обратное прессование труб с неподвижной иглой:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — затворный пресс-штемпель; 4 — игла; 5 — пустотелый пресс-штемпель; 6 — держатель пустотелого пресс-штемпеля; 7 — передняя поперечина пресса; 8 — заготовка; 9 — труба

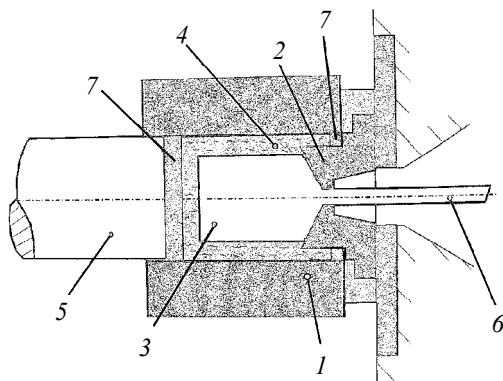


Рис. 6.10. Схема гидростатического прессования:

1 — контейнер; 2 — матрица; 3 — заготовка; 4 — гидростатическая среда; 5 — пресс-штемпель; 6 — пруток; 7 — уплотнения

и газообразных рабочих сред. Необходимое давление жидкости в контейнере создается либо под действием перемещения плунжера, либо подачей в контейнер извне (например, через центральное отверстие пресс-штемпеля). Таким способом прессуются чаще всего изделия из алюминиевых и медных сплавов в холодном состоянии, реже — стальные профили и трубы. Главным преимуществом

гидростатического прессования является отсутствие контакта заготовки со стенками контейнера и сил трения на контактных поверхностях, что существенно повышает однородность деформации по сечению и качество поверхности изделия.

Недостатки гидропрессования связаны с большой стоимостью специализированных прессов и инструмента, а также значительной скоростью выталкивания пресс-изделий при переходе потенциальной энергии сжимаемой жидкости в кинетическую энергию пресс-изделия. Последнее обстоятельство вызывает необходимость установки специальных тормозов для исключения смятия изделия. Поэтому широкого промышленного применения этот процесс пока не нашел.

Прессование с активным действием сил трения (рис. 6.11) обеспечивается за счет одновременного движения контейнера с большей скоростью  $v_k$ , чем скорость пресс-штемпера  $v_n$  и металла, в сторону матрицы. В результате контейнер увлекает за собой контактные слои заготовки, что облегчает прессование и способствует выравниванию скоростей течения металла по сечению заготовки, улучшению структуры, уменьшению величины пресс-остатка и вероятности пресс-утяжин.

Наибольший эффект этого вида прессования достигается при полном прилипании металла к контейнеру: например, при прессовании алюминиевых сплавов без смазки, а также при прессовании труб с подвижной иглой. Одним из недостатков прессования с подвижным контейнером является необходимость привода перемещения контейнера в прессовой установке.

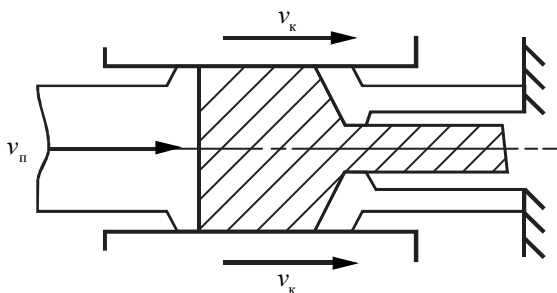


Рис. 6.11. Схема прессования с активным действием сил трения



Полунепрерывное прессование (рис. 6.12) нацелено на повышение выхода годного изделия и производительности, для этого пресс-остаток от прессования предыдущей заготовки используют для дальнейшего прессования «след в след».

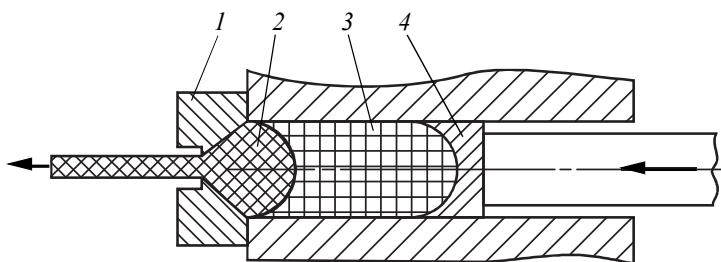


Рис. 6.12. Схема полунепрерывного прессования:

1 — матрица; 2 — прессуемая заготовка; 3 — следующая заготовка; 4 — вогнутая пресс-шайба

В процессе прессования пресс-остаток сваривается со следующей заготовкой, поэтому этот процесс чаще ведется без смазки с подогревом контейнера. Для лучшей сварки торцевых поверхностей используют вогнутую пресс-шайбу (рис. 6.12, 4), что обеспечивает выпуклую поверхность стыка, увеличивая ее площадь и, как следствие, прочность сваренного соединения. Полунепрерывным прессованием получают алюминиевую проволоку, шины для электропромышленности, осуществляют наложение свинцовой или алюминиевой оболочки на электрические кабели и т. п.

Н е п р е р ы в н о е п р е с с о в а н и е позволяет получать изделия большой длины за счет непрерывной подачи заготовки в канал матрицы (рис. 6.13). Для реализации процесса можно использовать различные принципы: гидропрессования (рис. 6.13, б), механической подачи с помощью задающих роликов (рис. 6.13, а), гусеничных траков (рис. 6.13, в) и др.

При этом виде прессования значительно повышаются выход годного изделия (за счет отсутствия пресс-остатков единичных заготовок) и производительность (ввиду экономии времени на перезарядку контейнера и замену инструмента). Кроме того, непрерыв-

ность процесса обеспечивает стабильность получаемых свойств изделий и возможность применения непрерывно-литой заготовки.

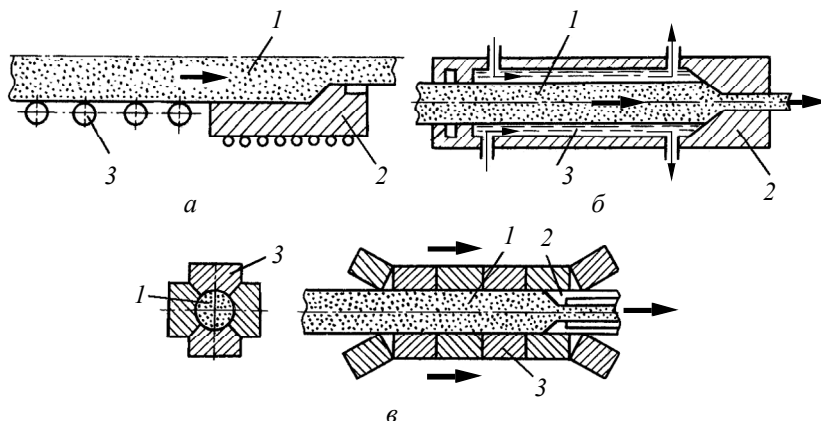


Рис. 6.13. Схемы непрерывного прессования с использованием различных способов (а–в) подачи заготовки:  
1 — прессуемый металл; 2 — матрицы; 3 — задающие органы;  
а — подача задающими роликами; б — с жидкостью высокого давления;  
в — бесконечной лентой гусеничных траков

Метод *Conform* (рис. 6.14) разработан в 1971 г. в Англии и представляет собой разновидность непрерывного прессования. Непрерывная подача заготовки в матрицу осуществляется с помощью силы трения от вращающегося экструзионного колеса, которое имеет по периметру желоб, соответствующий форме сечения исходной заготовки (прутка). Желоб уплотнен замыкающим элементом снизу, а выход из желоба закрыт затворным элементом сверху так, что течение металла возможно только через матрицу, установленную, чтобы обеспечивать тангенциальный (вверх) или радиальный (как показано на рис. 6.14) выход изделия (проволоки). Метод *Conform* применяется для прессования малопластичных сплавов с высокими коэффициентами вытяжки; прессования гранулированных и порошковых материалов; в комбинации с литьем, для чего жидкий металл заливается непосредственно в желоб экструзионного колеса, а также нанесения кабельной оболочки.

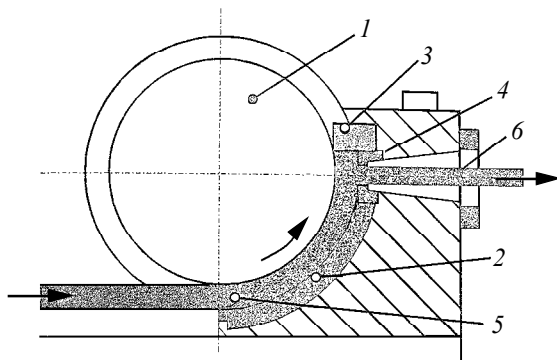


Рис. 6.14. Схема прессования по методу Conform:

1 — экструзионное колесо; 2 — замыкающий элемент; 3 — затворный элемент;  
4 — матрица; 5 — заготовка (пруток); 6 — прессуемое изделие (проволока)

### 6.3. Технологические схемы производства

Как отмечалось выше, прессованием получают либо готовые изделия, либо полуфабрикаты, которые в дальнейшем деформируются прокаткой и волочением. Технологические схемы прессования можно разделить на следующие группы по видам получаемых изделий<sup>8</sup>.

1. Прессование труб-полуфабрикатов с последующей прокаткой на редуционных и калибровочных станах.

2. Двухстадийное прессование прутков и труб, включающее прессование прутковой или трубной заготовки на горизонтальных прессах, изготовление сверленных заготовок (шашек) для труб и прессование на вертикальных или горизонтальных прессах. Материалы: никель, мельхиор, бронза, лутунь и некоторые стали.

3. Прессование прутков, профилей и труб на вертикальных прессах из сталей, вольфрамовых и молибденовых сплавов, меди, латуни.

---

<sup>8</sup> Шерба В. Н., Райтбарг Л. Х. Технология прессования металлов : учеб. для вузов. М. : Металлургия, 1995. С. 228.

4. Прессование на прессах без последующей обработки изделий в цехе. Схема используется для получения прутков, профилей и труб на заводах цветной металлургии.

5. Прессование пресс-изделий из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов с последующей термической и другой обработкой непосредственно в цехе.

Основные группы технологических операций, применяемых при изготовлении изделий прессованием:

- Подготовка слитков и заготовок к прессованию:
  - для изделий повышенного качества применяется гомогенизационный отжиг слитков для улучшения структуры;
  - резка заготовок на мерные длины на пресс-ножницах или пильных станках;
  - поверхностная обработка для изделий ответственного назначения: обточка либо отслаивание. Отслаивание — это удаление поверхностных слоев заготовки инструментальным роликом при сочетании вращательного движения заготовки и инструмента с их поступательным перемещением вдоль обрабатываемой поверхности. При этом стружка отделяется в виде широких полос;
  - для прессования со смазкой (например, заготовок из титановых сплавов и сталей) производится обточка переднего торца заготовки на конус, чтобы он соответствовал форме матричной воронки (см. рис. 6.6).
- Нагрев слитков и заготовок до рекомендованных температур в зависимости от химсостава сплава (см. подраздел 2.6). Тип печей — индукционные и электросопротивления.
- Удаление окалины, например путем скальпирования — проталкивания через специальную скальпирующую матрицу, которая может быть установлена перед прессом.
- Непосредственно прессование (перечень операций см. на рис. 6.5 и 6.6).
- Отделочные операции с целью придания товарного вида, улучшения качества, удаления смазки и окалины, нанесения покрытий, удаления поверхностных дефектов на готовых изделиях:

— травление (кислотное, щелочное, щелочно-кислотное) — это удаление окалины и ржавчины с последующей промывкой теплой и холодной водой и сушкой;

— обезжиривание с целью удаления смазки;

— анодирование (для алюминиевых сплавов) — образование защитной пленки оксида алюминия с целью повышения коррозионной стойкости изделий, а также повышения прочности сцепления с лакокрасочными покрытиями;

— нанесение защитных неорганических пленок, например хромистых, для магниевых сплавов, сильно подверженных коррозии; использование химического или электрохимического способа;

— дробеметная (дробеструйная) обработка для удаления окалины и технологической смазки с поверхности пресс-изделий из сталей и жаропрочных сплавов с использованием энергии сжатого воздуха в специальных установках для ускорения рабочих абразивных частиц (например, стальной и чугунной дроби);

— механические способы отделки (шлифование, полирование и т. п.) применяются для улучшения качества поверхности, а также получения определенной текстуры поверхности.

## 7. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ

Технологические схемы трубного производства довольно разнообразны (рис. 7.1). Известны следующие основные процессы: 1) прошивка исходной заготовки с получением полой толстостенной гильзы; 2) прессование и раскатка гильзы на оправке с целью утонения стенки; 3) прокатка на редуцированных или калибровочных станах с целью уменьшения (редуцирования) наружного диаметра; 4) холодная прокатка или волочение с целью получения высокоточных труб малых размеров с заданными свойствами. При производстве сварных труб применяют: 1) формовку листовой заготовки, 2) сварку кромок, 3) холодное волочение или прокатку сварной заготовки.

В качестве исходной заготовки чаще всего используют круглый сортовой прокат либо НЛЗ диаметром до 360 мм. Схемы, применяющие слиток, морально устарели. Осуществляется переход к перспективным схемам с использованием более качественной НЛЗ. В ряде случаев, когда необходима особо высокая точность при изготовлении труб ответственного назначения, применяют сверленную заготовку. Для производства сварных труб используют листовую заготовку (см. рис. 3.1).

### 7.1. Стадии производства

Производство бесшовных труб включает следующие стадии, показанные на рис. 7.1: прошивка, раскатка, редуцирование, калибровка. После нагрева до температуры ОМД (см. подразд. 2.6) слиток или НЛЗ подвергают прошивке для получения толстостенного стакана-гильзы. Известны три способа прошивки: 1) на стане винтовой прокатки, 2) на прессе и 3) пресс-валковая прошивка.

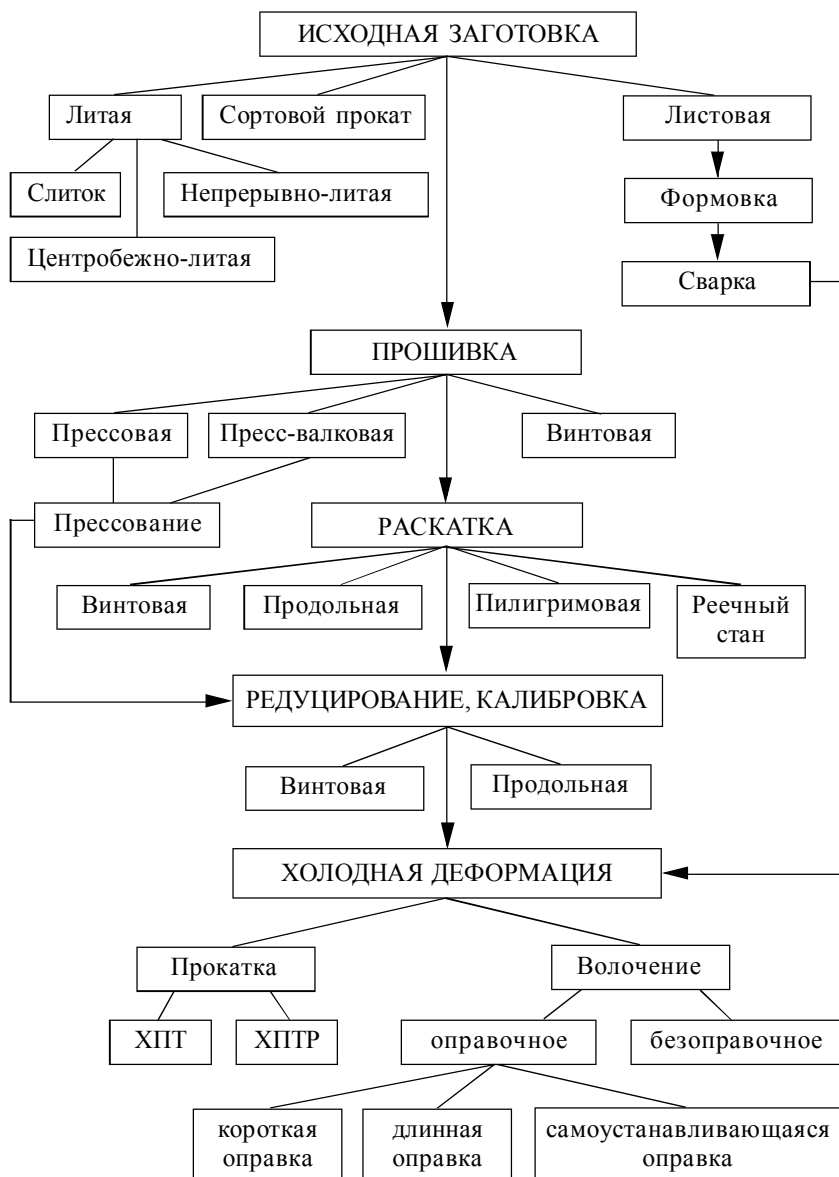


Рис. 7.1. Технологические схемы трубного производства

Наиболее распространенный и высокопроизводительный способ прошивки катаной заготовки или НЛЗ круглого сечения — на стане винтовой прокатки (рис. 7.2). При винтовой прокатке ось вращения валков повернута относительно оси прокатки (заготовки) на острый угол  $\beta = 5 \dots 15^\circ$ , который называется *у г л о м п о д а ч и* (см. рис. 7.2).

При этом заготовке сообщается одновременно поступательное и вращательное движение по винтовой линии. Такая схема обжатия вызывает разрыхление центральной зоны заготовки, что облегчает внедрение оправки и образование отверстия.

Для винтовой прокатки применяются бочковидные (см. рис. 7.2, 1), а также чашевидные, грибовидные или дисковые валки.

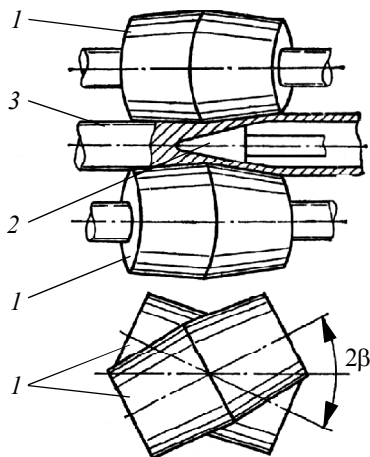


Рис. 7.2. Схема винтовой прошивки:

1 — бочковидные валки; 2 — оправка; 3 — прошиваемая заготовка

Для прошивки малопластичных сплавов и цветных металлов применяется менее производительный способ прессовой прошивки слитков. Наибольшее распространение получила заполняющая прошивка по методу Эргардта (рис. 7.3), где многогранный слиток или квадратную заготовку прошивают цилиндрическим пуансоном



в круглом контейнере. При этом по мере прошивки заполняются свободные зоны между контейнером и слитком без существенного увеличения высоты слитка. Прошивку осуществляют на горизонтальных прессах усилием 8—12 МН.

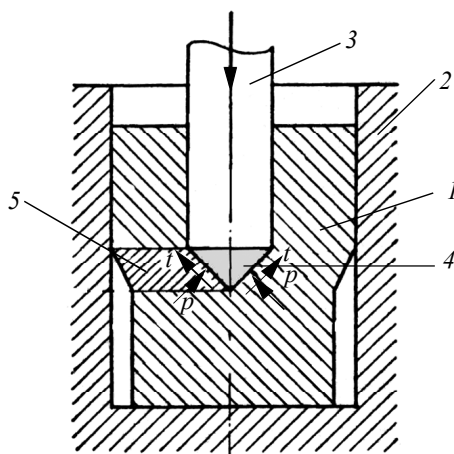


Рис. 7.3. Схема прессовой прошивки:

1 — слиток (заготовка); 2 — контейнер; 3 — игла (пуансон); 4 — зона затрудненной деформации («мертвый» конус); 5 — зоны интенсивной деформации

Комбинацией валковой и прессовой прошивки является пресс-валковая прошивка (рис. 7.4), которая позволяет прошивать квадратную НЛЗ с большей производительностью, чем на прессе.

Следующая стадия производства труб — раскатка на оправке с целью утонения стенки и удлинения трубы. Для этого применяют раскатные станы, которые работают по принципу продольной и винтовой прокатки. Наибольшее распространение получили станы продольной прокатки, когда ось вращения валков перпендикулярна оси прокатки. Известны следующие станы горячей продольной прокатки труб.

**Автоматический стан (АС)** — одноклетевой двух-валковый раскатной стан на короткой удерживаемой оправке. Раскатка производится за два прохода с кантовкой трубы на  $90^\circ$ , после

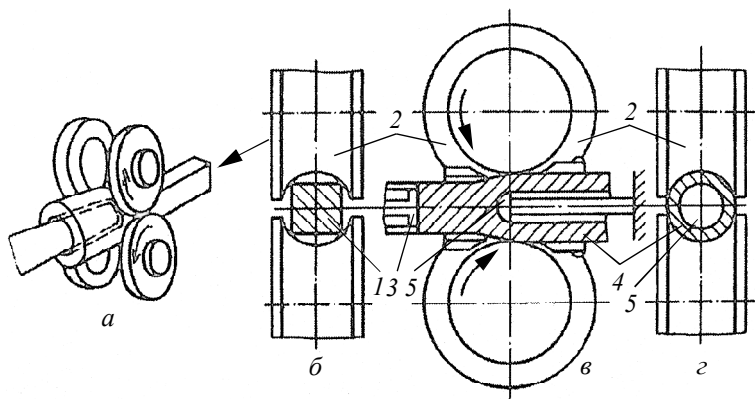


Рис. 7.4. Схема пресс-валковой прошивки:

*a* — общий вид; *б* — поперечное сечение на входе в очаг деформации; *в* — продольное сечение; *г* — поперечное сечение на выходе;  
 1 — заготовка; 2 — валки; 3 — пресс-штемпель; 4 — гильза; 5 — оправка

первого прохода труба возвращается на исходную позицию с помощью роликов обратной подачи (рис. 7.5). На АС не происходит значительного удлинения гильзы, так как коэффициент вытяжки невелик:  $\mu_a \leq 2,2$ .

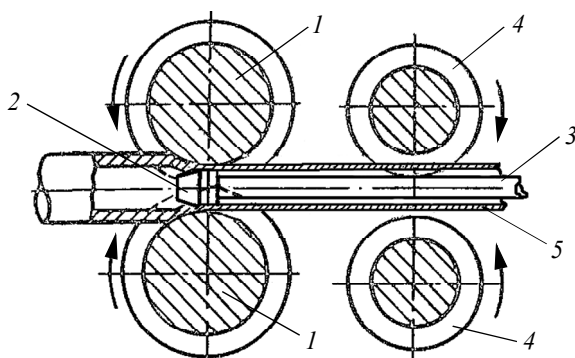


Рис. 7.5. Схема прокатки на автоматическом стане:

1 — валки; 2 — оправка; 3 — стержень крепления оправки; 4 — ролики обратной подачи; 5 — труба

Непрерывный стан (НС) — многоклетевой (3—9 клеток) раскатной стан на длинной подвижной или удерживаемой оправке (рис. 7.6). Труба одновременно прокатывается в нескольких клетях, поэтому стан называется непрерывным. Применение длинной оправки позволяет получать трубы большой длины с коэффициентом вытяжки  $\mu_n = 2,5 \dots 7$ . Для повышения равномерности обжатий соседние двухвалковые клетки стана взаимно-перпендикулярны и наклонены под углом  $45^\circ$  к горизонту. В последние годы применяется трехвалковая схема прокатки на удерживаемой оправке, при этом клетки расположены под углом  $60^\circ$  друг к другу.

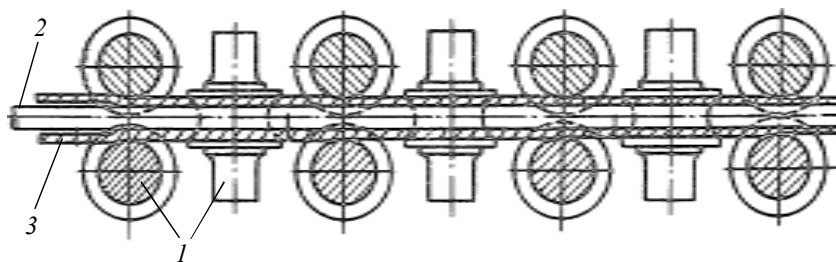


Рис. 7.6. Схема прокатки на непрерывном стане:

1 — валки; 2 — оправка; 3 — труба

Пилигримовый стан (ПС) — одноклетевой двухвалковый раскатной стан на длинной удерживаемой оправке (рис. 7.7). Относится к станам периодического действия, когда труба прокатывается порционно.

В рабочем периоде производится откат трубы в направлении движения валков, в холостом периоде, когда валки выходят из соприкосновения с трубой, с помощью подающего аппарата труба возвращается назад с задачей в валки недеформированного участка трубы длиной 20—40 мм и кантуется на угол  $90$ — $120^\circ$ . Главные преимущества пилигримового стана — большая дробность деформации и применение специальных пилигримовых валков с переменным ручьем, что позволяет достигать коэффициентов вытяжки  $\mu_n = 7 \dots 12$  и хорошо прорабатывать структуру литого металла.

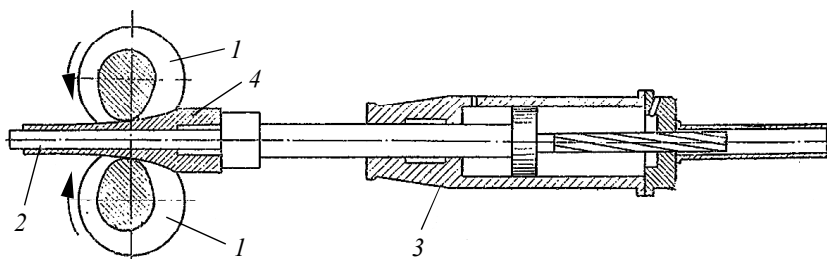


Рис. 7.7. Схема прокатки на пилигримовом стане:

1 — пилигримовые валки; 2 — оправка; 3 — подающий аппарат; 4 — труба

Реечный стан (РС) — многоклетевой (до 25 роликовых обойм) раскатной стан на длинной подвижной оправке. Деформация гильзы-стакана на РС осуществляется путем проталкивания его с помощью длинной цилиндрической оправки-дорна, которая упирается в дно стакана, через ряд роликовых обойм (рис. 7.8)<sup>1</sup>. Оправка, закрепленная на зубчатой рейке, приводится в движение от ведущей шестерни.

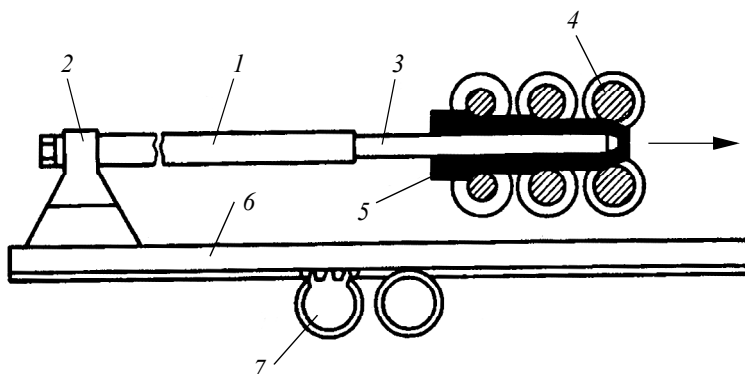


Рис. 7.8. Схема работы реечного стана:

1 — толкатель; 2 — держатель толкателя; 3 — оправка-дorn; 4 — калибры (роликовые обоймы); 5 — стакан; 6 — зубчатая рейка; 7 — ведущая шестерня

<sup>1</sup> Технология трубного производства: учеб. для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. М. : Интермет Инжиниринг, 2002. С. 255.

Раскатка также может производиться на 3-валковом стане винтовой прокатки на длинной оправке (рис. 7.9). Благодаря всесторонней схеме обжатия и движению заготовки по винтовой линии, на этом стане получают трубы высокой точности с коэффициентом вытяжки  $\mu$  до 3,5. Недостатками такой прокатки является ограничение сортамента (прокачиваются только толстостенные трубы с отношением диаметра к толщине стенки не более 10—11). Прокатка тонкостенных труб на 3-валковом стане невозможна из-за потери устойчивости концевых участков с образованием специфических дефектов — раструбов.

Утонение стенки гильзы может быть также произведено прессованием<sup>2</sup>.

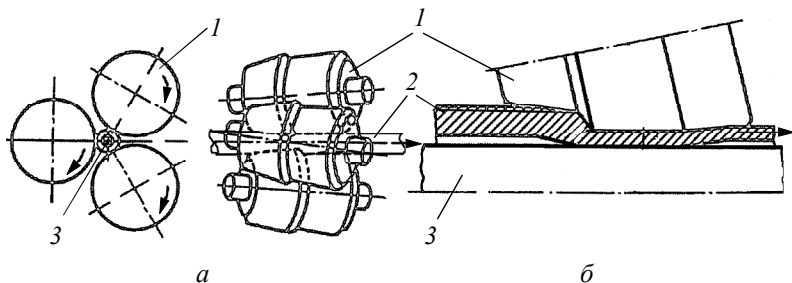


Рис. 7.9. Схема прокатки на 3-х валковом раскатном стане:

*а* — общий вид; *б* — очаг деформации;  
1 — валки; 2 — труба; 3 — оправка

На заключительном этапе трубы в горячем состоянии прокатываются на редуционно-калибровочных станах — многоклетевых (3—24 клетки) безоправочных станах с целью уменьшения наружного диаметра и калибровки. Схема обжатия на этих станах подобна схеме непрерывного стана без использования оправки.

<sup>2</sup> Схемы прессования труб и их описание приведены в разд. 6, посвященном прессованию (см. рис. 6.8, 6.9).

Горячедеформированные трубы получают на трубопрокатных (ТПА) либо трубопрессовых агрегатах, которые представляют собой технологические линии, включающие оборудование для нагрева заготовки, разделения ее на части, прошивки заготовки, раскатки полученной гильзы до нужных размеров, редуцирования и калибровки.

Получение труб меньших размеров (до 2 мм и менее) производится в трубоволочильных цехах путем многопроходной холодной деформации прокаткой и волочением. Схемы волочения приведены ранее (см. рис. 4.1), а схемы холодной прокатки — на рис. 7.10 (станы ХПТ) и рис. 7.11 (роликовые станы ХПТР).

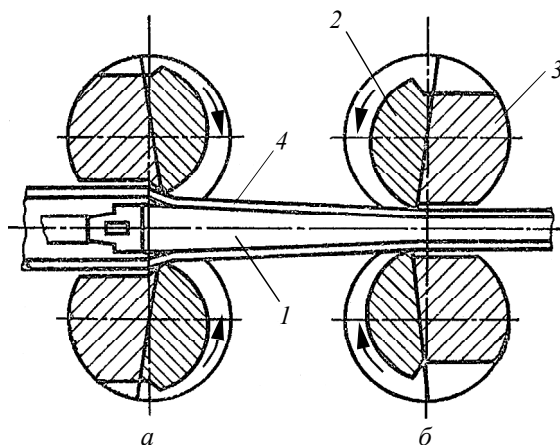


Рис. 7.10. Схема прокатки на стане ХПТ:

*а* — крайнее заднее положение; *б* — крайнее переднее положение;  
*1* — оправка; *2* — калибр; *3* — валок; *4* — труба

Особенности прокатки на стане ХПТ (рис. 7.10) заключаются в том, что используются сменные калибры с переменным ручьем, сужающимся по ходу прокатки; клеть совершает возвратно-поступательное движение, во время которого калибры перекатываются по неподвижной трубе и совершают обжатие; в крайних положениях клетки, когда труба не соприкасается с калибрами, подается оче-

редная порция заготовки длиной 10—30 мм и производится кантовка трубы на угол порядка  $60^\circ$ ; прокатка ведется на длинной слабоконической оправке, что обеспечивает сход с нее прокатанного участка трубы. Таким образом, труба прокатывается порциями, которые обжимаются многократно, что обеспечивает значительный коэффициент вытяжки  $\mu$  (до 6), высокие механические свойства и точность труб. Такой порционный способ прокатки, включающий периоды прокатки, подачи и кантовки трубы (наряду с пилгримовой прокаткой) называется *п е р и о д и ч е с к и м*.

Недостатки прокатки на стане ХПТ связаны с довольно низкой производительностью (до 300 м/ч), сложностью изготовления калибров, а также с большими динамическими нагрузками на элементы привода клетки.

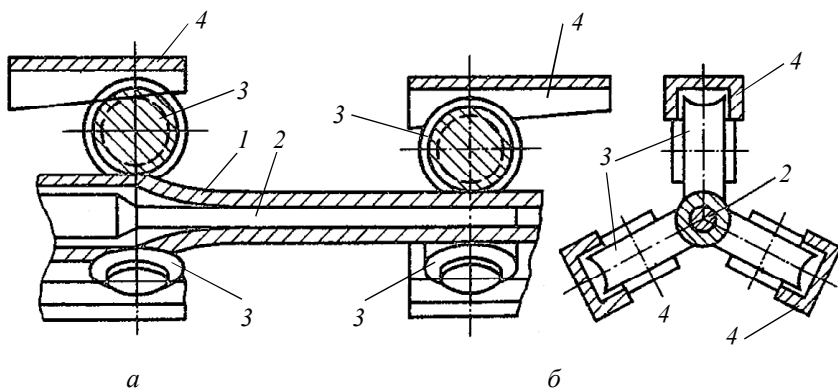


Рис. 7.11. Схема прокатки на стане ХПТР:

*а* — заднее положение; *б* — переднее положение;

*1* — прокатываемая труба; *2* — оправка; *3* — ролики; *4* — опорные планки

Прокатка на стане ХПТР (см. рис. 7.11) также относится к периодической, в заднем положении клетки производится подача порции трубы длиной 3—7 мм и кантовка на  $20$ — $40^\circ$ . Отличия от прокатки на стане ХПТ состоят в том, что обжатие происходит за счет увеличивающейся по ходу прокатки высоты опорных планок, кото-

рые опираются на цапфы роликов; используется 3- и 4-роликовая схема прокатки, ролики имеют постоянный ручей, а оправка — цилиндрическая. Производительность станков ХПТР очень низкая (до 40 м/ч), поэтому они используются для прокатки высокоточных особотонкостенных труб из высоколегированных сталей с коэффициентом вытяжки  $\mu$  до 2,5.

Сварные трубы производятся на трубоэлектросварочных агрегатах, агрегатах печной сварки и др., включающих оборудование для подготовки и подогрева исходной заготовки, формовки, сварки, удаления грата и, в ряде случаев, волочильные или редукционные станы для расширения сортамента (уменьшения размеров) труб.

Формовка (сворачивание) плоской трубной заготовки (листа, ленты, штрипса) в цилиндрическую — основная формообразующая операций всех технологических процессов производства сварных труб. Многообразие способов сварки (рис. 7.12) обуславливает и применение различных способов формовки.

Формовка может осуществляться в горячем и холодном состоянии. Горячая формовка применяется при непрерывной печной сварке и осуществляется в приводных валках.

Наибольшее применение нашли следующие способы холодной формовки: гибка в вальцах, на прессах, спиральная формовка (для изготовления спиралешовных труб большого диаметра) и формовка на непрерывных валковых станах.

Наиболее современный способ формовки — непрерывная формовка на многоклетевых валковых станах, применяемая при производстве труб из рулонной заготовки (ленты) электрической сваркой (рис. 7.13). Валковую формовку можно считать разновидностью прокатки, так как она осуществляется во вращающихся валках.

Последовательное изменение формы поперечного сечения заготовки от плоской до круглой называется **ц в е т к о м ф о р м о в к и**.



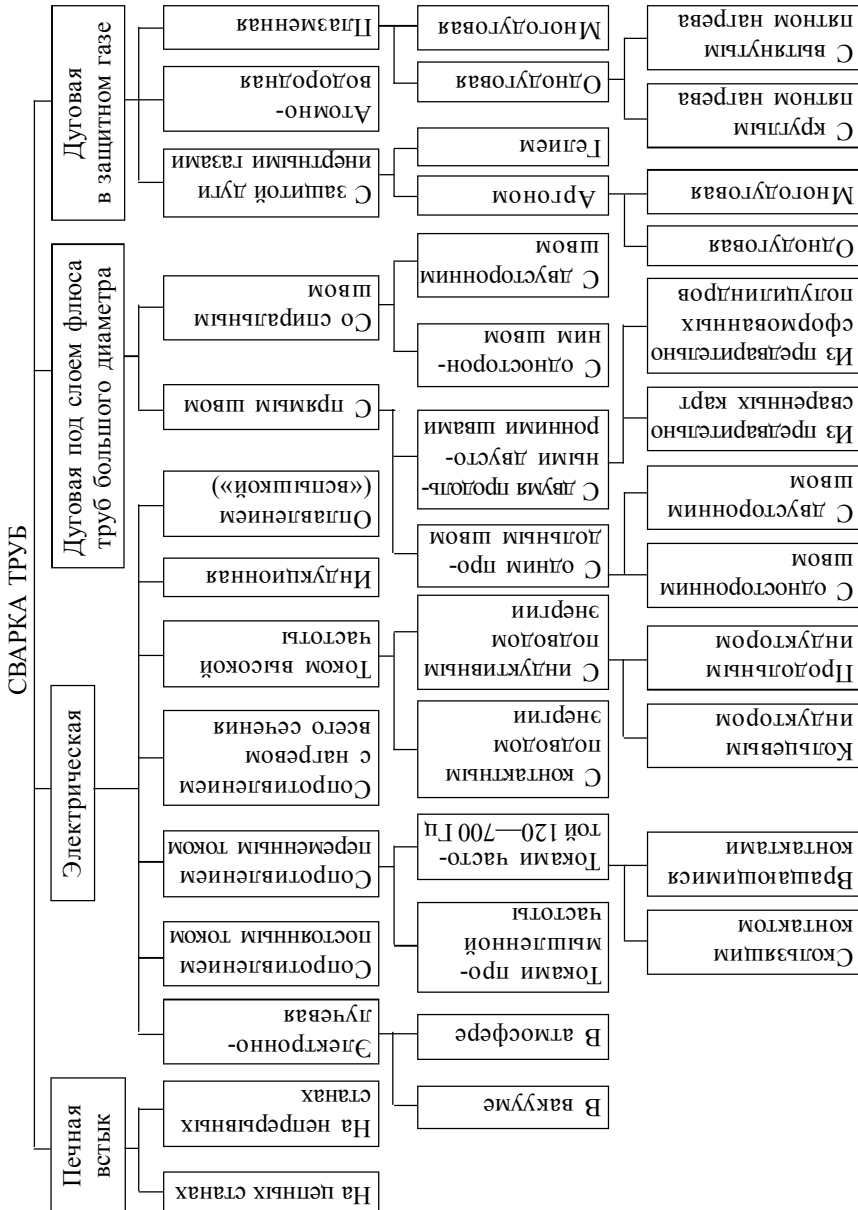


Рис. 7.12. Классификация способов сварки труб

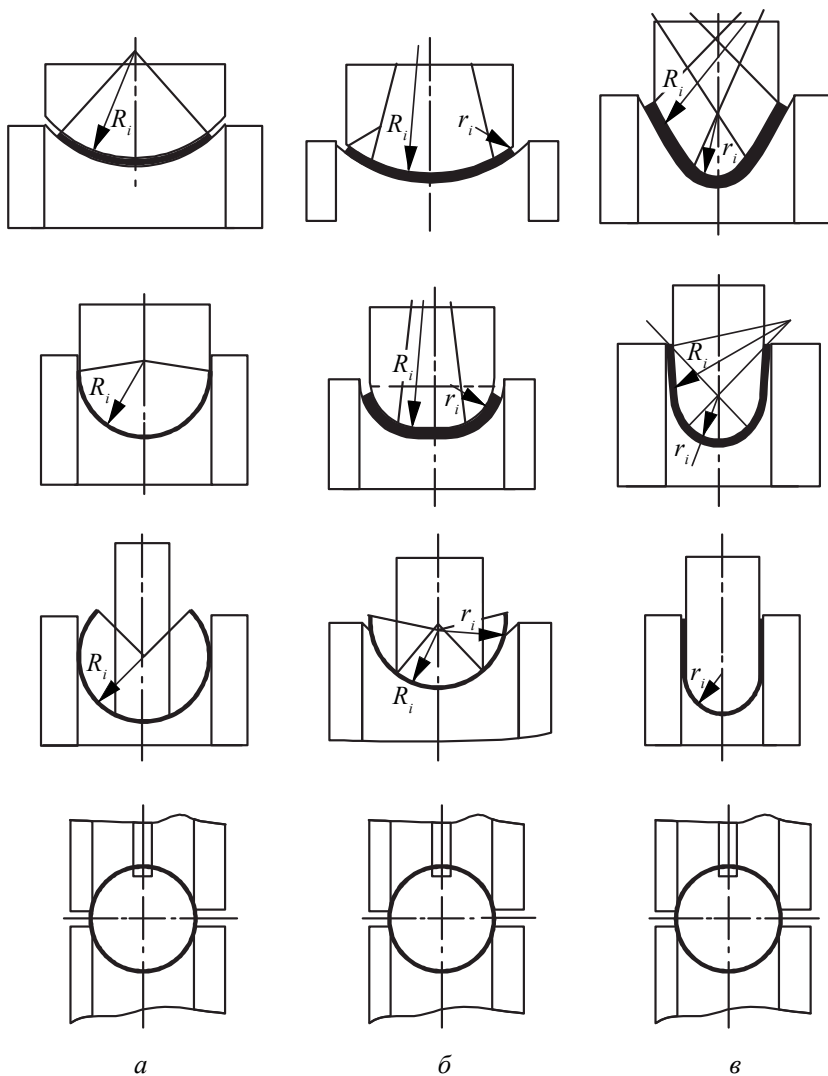


Рис. 7.13. Схемы формовки трубной заготовки на валковых формовочных станах:

*a* — однорядная; *б, в* — двухрядные

## 7.2. Производство на трубопрокатных агрегатах

Название трубопрокатного агрегата (ТПА) дается по типу раскатного стана, известны следующие трубопрокатные агрегаты:

- с автоматическим станом (АС);
- с непрерывным станом (НС);
- с пилигримовым станом (ПС);
- с речным станом (РС);
- с 3-валковым раскатным станом.

• ТПА с АС являются наиболее распространенными для производства бесшовных труб. Широкое применение их объясняется большой маневренностью и универсальностью сортамента прокатываемых труб. На ТПА с АС прокатывают трубы наружным диаметром  $D = 50 \dots 426$  мм, толщиной стенки  $S = 3,5 \dots 40$  мм и относительной тонкостенностью  $D/S = 4 \dots 50$  из большинства марок сталей. Также агрегат имеет достаточно высокую производительность и низкий расходный коэффициент металла.

К недостаткам прокатки на АС относят низкое качество внутренней поверхности из-за использования закрепленной оправки; повышенную поперечную разностенность, наводимую в выпусках калибра; низкий коэффициент вытяжки ( $\mu_a \leq 2,2$ ), что приводит к необходимости повышения коэффициента вытяжки при прошивке.

Классическая схема агрегата предусматривает получение полых гильз на прошивном стане, прокатку этих гильз в трубы на автоматическом стане, затем раскатку трубы в риллинг-станах (обкатных станах винтовой прокатки на короткой оправке) и калибровку-редуцирование в редуционных или калибровочных станах.

• На ТПА с НС прокатывают трубы наружным диаметром  $D = 28 \dots 120$  мм, толщиной стенки  $S = 2,5 \dots 15$  мм и относительной тонкостенностью  $D/S = 10 \dots 40$  из углеродистых и легированных марок сталей. По сравнению с АС сортамент труб отличается меньшими размерами и большей тонкостенностью, а также ограничением на прокатку нержавеющей труб в связи с возможностью налипания металла на длинную оправку.

К достоинствам НС относят высокую производительность, высокое качество внутренней поверхности ввиду малого скольжения металла по оправке, большие коэффициенты вытяжки ( $\mu_n = 2,5 \dots 7$ ), возможность прокатки труб большой длины.

Недостатки НС связаны с такими особенностями непрерывной прокатки, как образование утолщенных концов, высокий расходный коэффициент металла, большой парк инструмента, необходимость дополнительных операций по извлечению оправки. При использовании схем прокатки на удерживаемой оправке необходимость в извлечении оправки отпадает.

В состав ТПА с НС входят нагревательная печь, ножницы горячей резки для разделения заготовки, прошивной стан, может быть установлен обжимной стан винтовой прокатки для уменьшения диаметра НЛЗ, непрерывный стан, оправкоизвлекатель и линия подготовки оправок, редуccionно-калибровочный стан.

- На ТПА с ПС производят трубы диаметром до 720 мм и толщиной стенки до 80 мм. Отличительной особенностью агрегата классического типа является применение слитков в качестве исходной заготовки и получение гильзы на прошивном прессе. Главным преимуществом пилигримового стана является большая дробность деформации, что позволяет достигать коэффициентов вытяжки  $\mu_n = 7 \dots 12$  и хорошо прорабатывать структуру литого металла.

Недостатками ПС являются низкая производительность, повышенный расход металла из-за недоката заднего конца трубы, низкая точность прокатываемых труб, а также сложность изготовления пилигримовых валков.

Классический агрегат имеет в своем составе две кольцевые или туннельные печи, горизонтальный или вертикальный прошивной пресс, стан-элонгатор винтовой прокатки для удлинения стаканов, два пилигримовых стана, режущие устройства, подогревательную печь и калибровочные или редуccionные станы.

- ТПА с РС получают трубы диаметром 21...245 мм с толщиной стенки 2,5...14,2 мм из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей. Способ имеет очевидные преимущества: простота, малая энергоемкость, возможность получения тонкостенных

труб диаметром до 21 мм, а также использование непрерывно-литой заготовки круглого или квадратного сечения. Современные агрегаты с реечным станом применяются с 60-х гг. XX в. в Германии, Великобритании, Испании, Польше и других странах и включают гидравлический пресс для прошивки слитка, станы-удлинители (элонгаторы), печи для подогрева стаканов, реечные станы, устройства для извлечения дорнов, редуционно-калибровочные станы. В России эти агрегаты почти не нашли применения.

- На ТПА с 3-валковым раскатным станом получают толстостенные трубы повышенной точности диаметром 35...200 мм и толщиной стенки 10...50 мм. В состав агрегата входят кольцевая печь, прошивной и раскатной станы винтовой прокатки, оправко-извлекатель, подогревательная печь, калибровочный стан винтовой прокатки, иногда устанавливают дополнительно пятиклетевой калибровочный стан продольной прокатки. Основное преимущество этого агрегата в том, что все три стана работают по принципу винтовой прокатки, что позволяет их легко перенастроить на получение труб другого диаметра. На других агрегатах со станами продольной прокатки расширение сортамента связано с увеличением парка валков с калибрами разных размеров.

В качестве примера рассмотрим технологию изготовления труб на ТПА с НС. Схема расположения оборудования на ТПА-80 приведена на рис. 7.14. Основные технологические операции, выполняемые на этом ТПА:

- подача заготовки в цех железнодорожным транспортом и складирование на цеховом складе;
- осмотр заготовки, укладка электромостовыми кранами в загрузочное устройство;
- заготовка длиной до 9 м поштучно подается в печь;
- нагрев заготовки в печи с шагающим подом до температуры прошивки;
- резка нагретой заготовки на ножницах;
- зацентровка заготовки с помощью пневматического зацентровщика;

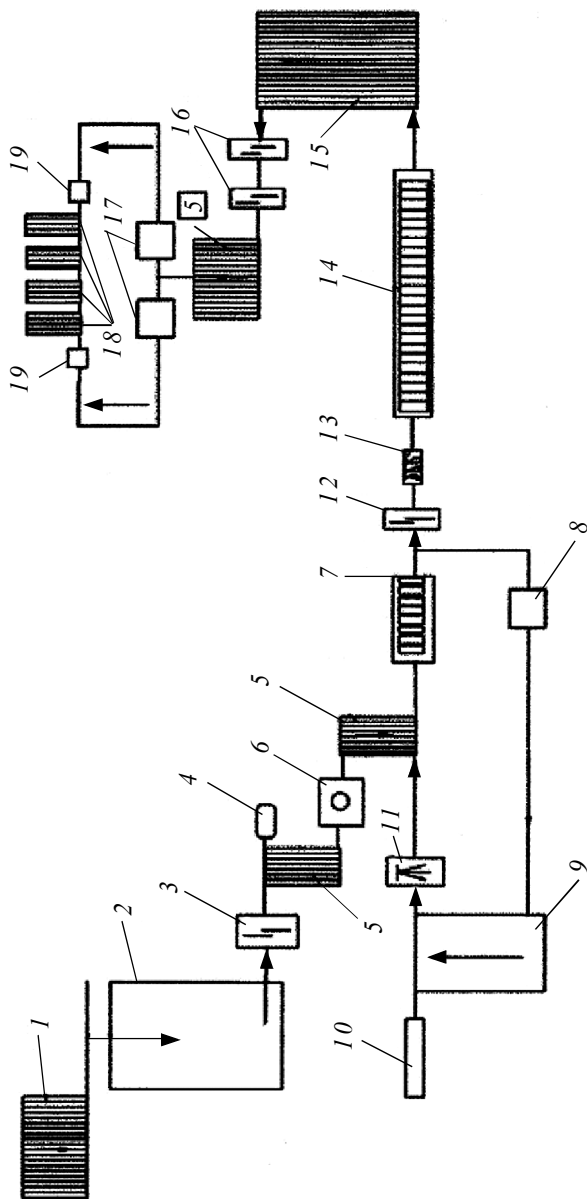


Рис. 7.14. Схема ТПА-80 с непрерывным станом:

1 — загрузочное устройство заготовки; 2 — нагревательная печь с шагающим подом; 3 — ножницы горячей резки; 4 — зацентрорщик; 5 — передающее устройство; 6 — прошивной стан; 7 — непрерывный стан; 8 — оправкоизвлекатель; 9 — ванна для охлаждения оправок; 10 — печь для подогрева оправок; 11 — устройство для смазки оправок; 12 — пила отрезки заднего конца; 13 — индукционная печь; 14 — редукционный стан; 15 — холодильник; 16 — пила холодной резки; 17 — правильные машины; 18 — стол ОТК; 19 — приборы неразрушающего контроля

- прошивка заготовки в двухвалковом стане винтовой прокатки с получением гильзы длиной до 6 м;
- перед прокаткой на НС в гильзу вводится предварительно смазанная длинная цилиндрическая оправка;
- прокатка на 8—9-клетьевом НС, клетки которого взаимно-перпендикулярны и наклонены под углом  $45^\circ$  к горизонту;
- извлечение оправки после прокатки на двухпозиционном оправкоизвлекателе, охлаждение в ванне, смазка поверхности и подача на входную сторону НС;
- после НС трубы длиной до 30 м поступают к пиле для обрезки заднего разлохмаченного конца;
- подогрев в индукционной установке;
- прокатка в 24-клетевом редукионном стане с получением труб длиной 68—71 м;
- охлаждение труб в холодильнике речного типа шириной 74 м;
- в конце холодильника трубы набираются в однорядные пакеты и поступают к пилам холодной резки для обрезки утолщенных концов и порезки на заданные длины;
- порезанные пакеты транспортируются на линию трубоотделки, где производится правка, продувка, контроль качества труб.

Основным технологическим документом ТПА является таблица прокатки, в которую заносятся результаты расчетов параметров настройки станов, размеров поперечного сечения труб на выходе из станов, коэффициентов вытяжки по станам и др.

Р а с ч е т т а б л и ц ы п р о к а т к и проводят против хода технологического процесса в следующем порядке:

1) рассчитывают размеры трубы в горячем состоянии после редуцирования с учетом теплового расширения по формуле

$$D_r = (1 + \alpha \cdot T) D_x;$$

2) определяют толщину стенки трубы после непрерывного стана с учетом изменения толщины стенки трубы при редуцировании  $S_H = S_p \pm \Delta S_p$  (изменение толщины стенки зависит от режима прокатки в редукионном стане);

3) диаметр трубы после непрерывного стана фиксирован для данного агрегата (обычно  $D_n = 92 \dots 108$  мм);

4) рассчитывают диаметр оправки непрерывного стана с учетом зазора для ее извлечения;

5) по опытным данным задают обжатие по стенке в НС  $\Delta S_\Sigma = 11 \dots 13$  мм и определяют размеры гильзы;

6) диаметр цилиндрической заготовки назначают на 2—5 % больше диаметра гильзы, обычно  $D_3 = 120 \text{—} 160$  мм;

7) рассчитывают коэффициенты вытяжки по агрегатам и результаты заносят в таблицу.

Пример основных расчетов для некоторых труб из заготовки диаметром 120 мм приведен в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1

Таблица прокатки ТПА с непрерывным станом, мм

Номинальный размер холодных труб		ПРОШИВНОЙ СТАН			НЕПРЕРЫВНЫЙ СТАН			РЕДУКЦИОННЫЙ СТАН			
		Размеры гильзы		Коэф- фици- ент вытяж- ки $\mu_n$	Размер черновой трубы		Коэф- фици- ент вытяж- ки $\mu_n$	Размер готовых (горячих) труб		Чис- ло кле- тей	Коэф- фици- ент вытяж- ки $\mu_p$
$D_T$	$S_T$	$D_g$	$S_g$		$D_n$	$S_n$		$D_p$	$S_p$		
42	4,0	124	15	2,20	94	4,0	4,54	42,80	4,0	18	2,32
42	5,0	124	18	1,89	94	4,8	4,46	42,80	5,0	18	2,27
42	6,0	124	18	1,89	94	5,7	3,79	42,80	6,0	18	2,28
45	3,0	124	14	2,34	94	3,2	5,30	45,30	3,0	18	2,29
45	4,0	124	15	2,20	94	4,0	4,54	45,30	4,0	18	2,18
45	5,0	124	18	1,89	94	4,8	4,46	45,30	5,0	18	2,12
45	6,0	124	18	1,89	94	5,7	3,79	45,30	6,0	18	2,13
48	3,0	124	14	2,34	94	3,2	5,30	48,60	3,0	16	2,12
48	4,0	124	15	2,20	94	4,0	4,54	48,60	4,0	16	2,02
48	5,0	124	18	1,89	94	4,8	4,46	48,60	5,0	16	1,96



### 7.3. Производство на трубопрессовых агрегатах

Прессованием получают в основном трубы разных сечений из цветных металлов и труднодеформируемых высоколегированных сталей диаметром 20—280 мм и толщиной стенки 1,5—40 мм. По сравнению с прокаткой производство труб прессованием имеет следующие преимущества:

- меньшие капитальные затраты и время на переналадку оборудования;
- возможность применять сплавы, которые не поддаются прошивке на станах винтовой прокатки;
- большие коэффициенты вытяжки, меньше циклов деформации;
- возможность изготавливать профильные трубы.

Трубы получают на вертикальных и горизонтальных трубопрессовых установках в две основные стадии: прошивка сплошной заготовки (рис. 7.3) и непосредственно прессование (рис. 6.8; 6.9).

Рассмотрим технологию на примере производства труб из высоколегированных сталей. Исходной заготовкой служат круглые катаные штанги диаметром 100—270 мм и длиной 2—7 м. Технологический процесс проводится в следующей последовательности:

- 1) разрезка штанг на мерные длины, нагрев в индукционной печи;
- 2) прошивка заготовки в полуу гильзу на прошивном прессе;
- 3) подогрев гильзы в индукционной печи, смазка волокнистым стеклом;
- 4) подача гильзы в контейнер горизонтального гидравлического пресса, ввод иглы в гильзу, прессование трубы;
- 5) отрезка пресс-остатка и отделение пресс-шайбы;
- 6) отделка трубы: термическая обработка, правка, зачистка, травление, нанесение покрытий.

## 7.4. Производство на трубосварочных агрегатах

Различают трубосварочные агрегаты печной сварки, электрической сварки для получения труб средних размеров, а также агрегаты для получения труб большого диаметра с помощью дуговой сварки.

Рассмотрим технологию изготовления труб на трубоэлектросварочном агрегате. Этот агрегат широко применяется для производства водогазопроводных, нефтепроводных и конструкционных труб диаметром от 6 до 630 мм с толщиной стенки 0,2...12 мм. В качестве исходной заготовки служит штрипс, а также холоднокатаная и горячекатаная полосы в рулонах. На агрегате (рис. 7.15) выполняются следующие операции:

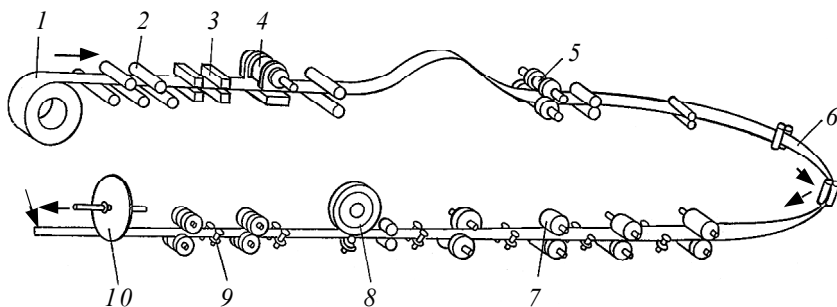


Рис. 7.15. Схема трубозлектросварочного агрегата:

1 — рулон с лентой; 2 — правильная машина; 3 — ножницы; 4 — стыкосварочная машина; 5 — дисковые ножницы для обрезки кромок; 6 — петлеобразователь; 7 — формовочный стан; 8 — сварочный узел; 9 — калибровочный стан; 10 — отрезной станок

1) установка рулона в разматыватель (передний конец задают в многоклетевую правильную машину для правки ленты);

2) обрезка смежных концов выправленной ленты на гильотинных ножницах;

3) стыкосварка смежных концов рулона в специальной машине;

4) образование запаса ленты в петлеобразователе с передними и задними тянущими роликами для обеспечения непрерывной работы агрегата;

5) обрезка боковых кромок на дисковых ножницах в соответствии с расчетной шириной ленты;

6) формовка подготовленной ленты в трубную заготовку в многоклетевом формовочном стане (схемы формовки — см. рис. 7.13);

7) сварка кромок свернутой заготовки в сварочном узле стана (возможные способы электрической сварки — см. рис. 7.12);

8) удаление наружного грата на гратоснимателе резового типа;

9) калибровка, правка трубы и разрезка на мерные длины.

На агрегатах печной сварки производят газопроводные трубы диаметром 6...114 мм и толщиной стенки 1,8...5 мм из низкоуглеродистых марок стали. Основное отличие этого агрегата от вышерассмотренного — нагрев штрипса перед формовкой и сваркой в печи до температуры 1350—1400 °С, причем температуру кромок путем обдувки сжатым воздухом или кислородом доводят до температуры плавления стали около 1500 °С. В состав агрегата входят также холодильник для охлаждения труб и редуционно-калибровочный стан.

При изготовлении труб большого диаметра (более 400 мм) применяют дуговую сварку под слоем флюса. Различают трубы большого диаметра с прямым и спиральным швом.

Трубы с п р я м ы м ш в о м производят диаметром 426—1220 мм, с толщиной стенки 3—13 мм и длиной 6—12 м. В качестве исходной заготовки используют горячекатаную листовую сталь мерной длины от 6 до 12,5 м. Трубы изготавливаются в следующей последовательности:

1) правка листов в многовалковой правильной машине;

2) подрезка продольных кромок на кромкострогальном станке;

3) очистка кромок от окалины на дробеметной установке;

4) подгибка кромок по радиусу, близкому к радиусу готовой трубы на трехклетевом валковом стане;

5) предварительная формовка листа на гидравлическом прессе до U-образной формы;

- б) окончательная формовка на прессе;
- 7) наружная сварка кромок на непрерывных валковых станах с горизонтальными и вертикальными валками;
- 8) внутренняя сварка на сварочных станах;
- 9) подрезка концов труб, зачистка сварочного шва;
- 10) окончательная обработка труб на гидравлическом прессе-экспандере: калибровка, правка, упрочнение, испытание труб гидравлическим внутренним давлением.

Трубы со спиральным швом изготавливают наружным диаметром 426—2520 мм, толщиной стенки 3—15 мм и длиной 12—18 м из горячекатаной листовой стали в рулонах. Спиральная сварка позволяет использовать лист одной ширины для производства труб различного диаметра. К преимуществам спиральной сварки относят более высокую конструктивную прочность (на 20—40 % выше), непрерывность и большую мобильность процесса, возможность сварки тонкостенных труб.

Технология производства спиралешовных труб отличается использованием специального формующего устройства, смонтированного на опорно-поворотной раме с установкой нужного угла формовки. Сварка кромок производится вначале внутренней сварочной головкой, наружную сварку проводят через полвитка спирали в верхней точке трубы. Полученные трубы не нуждаются в дополнительной правке и калибровке.

## 7.5. Производство холоднодеформированных труб

Холодной прокаткой и волочением получают профильные и круглые трубы диаметром до 5 мм и менее, с толщиной стенки до 0,05 мм, а также трубы с более высокими показателями качества — точностью, чистотой поверхности, механическими свойствами.

Особенности изготовления холоднодеформированных труб на отечественных заводах, в отличие от автоматизированных технологий производства горячекатаных труб на трубопрокатных агрегатах и электросварных труб на трубоэлектросварочных агрегатах, заключаются в следующем:

- в связи с малыми коэффициентами вытяжки за один проход для получения труб малых размеров используется многопроходная и циклическая схема производства;

- для обработки труб между проходами (термическая и химическая обработка) применяется пакетный способ обработки;

- многоциклическая обработка труб приводит к повышенному расходу металла и удорожает трубы;

- пакетный способ обработки связан с большим объемом транспортных операций, что повышает численность работающих и себестоимость труб.

Технологический процесс рассмотрим на примере изготовления трубы размерами  $5 \times 0,5$  мм ( $5$  — наружный диаметр  $D$ ,  $0,5$  — толщина стенки  $S$ ) из нержавеющей стали для авиационной техники (табл. 7.2).

В качестве исходной заготовки используется труба  $89 \times 9$  мм, полученная на ТПА с автоматическим станом. Перед запуском в производство трубы-заготовки подвергаются входному контролю: проверяется микроструктура по загрязненности неметаллическими включениями, содержанию ферритной фазы, склонности к межкристаллитной коррозии, величине зерна; проводится контроль механических свойств и химического состава.

Далее последовательно выполняются следующие операции:

- обточка наружной поверхности заготовки и расточка ее внутренней поверхности до размера  $88 \times 8$  мм (производится съем поверхностных слоев металла на токарных станках для удаления дефектов и получения требуемой шероховатости внутренней и наружной поверхности);

- обезжиривание химическим способом для удаления остатков смазочно-охлаждающей жидкости, применяемой при механической обработке (производится в ванне с раствором азотной и плавиковой кислот при температуре  $70\text{—}90$  °С в течение 15 мин);

Т а б л и ц а 7.2

*Маршрут производства трубы размером 5 × 0,5 мм*

№ прохода	Размеры трубы ( $D \times S$ ), мм	Вид операции	Коэффициент вытяжки	ТО
00	89 × 9,0	Заготовка	—	+
0	88 × 8,0	Расточка, обточка	—	+
1	68 × 5,1	ХПТ-90	2,13	+
2	38 × 2,6	ХПТ-55	3,24	+
3	20 × 1,1	ХПТ-32	4,15	+
4	18 × 0,65	ХПТР 15—30	1,69	+
5	14 × 0,7	БО	1,24	+
6	12 × 0,48	ХПТР 8—15	1,82	+
7	8 × 0,51	БО	1,38	+
8	6 × 0,55	БО	1,23	+
9	5 × 0,58	БО	1,35	+
10	5 × 0,5	Шлифовка		—

*Примечания:*  $D$  — наружный диаметр,  $S$  — толщина стенки; ХПТ-90 — типоразмер стана холодной прокатки труб валкового типа (90 — максимальный диаметр прокатываемой трубы, мм); аналогично — станы ХПТ-55, ХПТ-32; ХПТР 15—30 — типоразмер стана холодной прокатки труб роликового типа (15—30 — диапазон диаметров прокатываемых труб, мм); аналогично — стан ХПТР 8—15; БО — безоправочное волочение; ТО — наличие термической обработки после операции.

— промывка холодной водой, выдержка в ванне с горячей водой и сушка;

— термическая обработка труб в электрической печи сопротивления;

— травление для удаления окалина химическим способом в две стадии: в щелочном расплаве и в азотно-плавиковом растворе;

— правка на косовалковой правильной машине для исправления кривизны после термической обработки;

- нанесение подсмазочного покрытия и смазки;
- теплая прокатка на станах ХПТ до размера  $20 \times 1,1$  мм (подогрев производится в индукторе на входной стороне стана до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
- после каждой прокатки проводятся следующие операции: разрезка труб на части по ходу прокатки, обезжиривание, термическая обработка (рекристаллизационный отжиг, травление, правка, обработка концов труб, продувка сжатым воздухом, нанесение подсмазочного покрытия и технологической смазки);
- прокатка на стане ХПТР 15—30 на размер  $18 \times 0,65$  мм перед безопрачным волочением (БО);
- перед каждым БО проводятся операции: разрезка труб на части, обезжиривание, термическая обработка (рекристаллизационный отжиг, травление, правка, обработка концов труб, продувка сжатым воздухом, забивка волочильных головок, нанесение подсмазочного покрытия и технологической смазки);
- чередование ХПТР и БО с выполнением перечисленных сопутствующих операций;
- на готовом размере  $5 \times 5,58$  мм после безопрачного волочения производятся операции: обрезка головок у труб после волочения, порезка на длины, обезжиривание, промывка из брансбойта, сушка, термическая обработка, травление, правка на правильном валковом стане, шлифовка наружной поверхности, маркировка труб ударным способом, подрезка концов, зачистка заусенцев, продувка сжатым воздухом, дробеструйная очистка внутренней поверхности труб, обезжиривание химическим способом, осмотр внутренней поверхности труб перископом, электрохимическая полировка внутренней поверхности труб, отбор образцов для технологических испытаний, металлографического контроля и испытаний на механические свойства, маркировка труб и образцов, зачистка заусенцев; осмотр наружной поверхности, контроль геометрических размеров; приборный контроль (ультразвуковой), подрезка концов труб, вырезка дефектных участков, продувка сжатым воздухом, осмотр торцов труб и контроль толщины стенки, стилоскопирование для быстрого анализа химсостава стали, химическая обработ-

ка труб, осмотр наружной и внутренней поверхности труб, оформление ярлыков и сопроводительной документации на пакет, маркировка, упаковка.

Таким образом, видно, что технология производства холоднодеформированных труб многооперационна, многоциклична и приводит к повышенному расходу металла ввиду многочисленных повторяющихся операций расточки, обточки, шлифовки, обрезки волоочильных головок, травления, обработки торцов и др.

Для повышения эффективности производства холоднодеформированных труб и снижения цикличности развиваются следующие направления:

1) повышение разовых деформаций за проход: например, за счет совершенствования конструкций прокатных станов (применение четырехвалковых клетей «тандем»);

2) использование исходной заготовки минимальных размеров, например электросварной;

3) сокращение числа вспомогательных операций (например, применение безотжиговой прокатки, обработки без подсмазочных покрытий, исключения обезжиривания за счет использования самовозгоняющихся смазок);

4) совмещение основных и вспомогательных операций (волочения и правки, разрезки «на ходу», термоправки и др.).



## 8. СОВМЕЩЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Выше были рассмотрены традиционные процессы ОМД, которые включают нагрев заготовки и ее пластическую деформацию. На заключительной стадии для придания определенных свойств изделиям проводится термическая обработка, связанная с повторным нагревом уже остывшей заготовки. Для экономии энергии, связанной с повторными нагревами, более рациональной организации технологического процесса, повышения качества металла предложены совмещенные процессы, объединяющие традиционные способы ОМД и другие способы получения и обработки изделий (чаще всего это литейный передел и термическая обработка). Рассмотрим некоторые из них.

### 8.1. Литье-штамповка

Наиболее простой совмещенный процесс — штамповка металла в период кристаллизации. Металл затвердевает и кристаллизуется в период штамповки. Схема процесса типична для штамповки в закрытом штампе (рис. 8.1).

В исходной позиции (рис. 8.1, *а*) металл заливается в металлоприемник, выполняющий функции нижнего штампа, и обжимается пуансоном, при этом должна быть обеспечена герметичность штампа. Применяемый комбинированный штамп обеспечивает также удаление поковки из рабочей полости с помощью съемника и пружинно-рычажного механизма. К преимуществам такого процесса относятся снижение энергозатрат за счет исключения нагрева и обработки исходной заготовки, малые усилия штамповки жидкого металла, более высокий коэффициент использования металла — отношения массы детали к массе заготовки ( $K_{\text{им}} = \frac{G_{\text{д}}}{G_0}$ ) до 0,93;

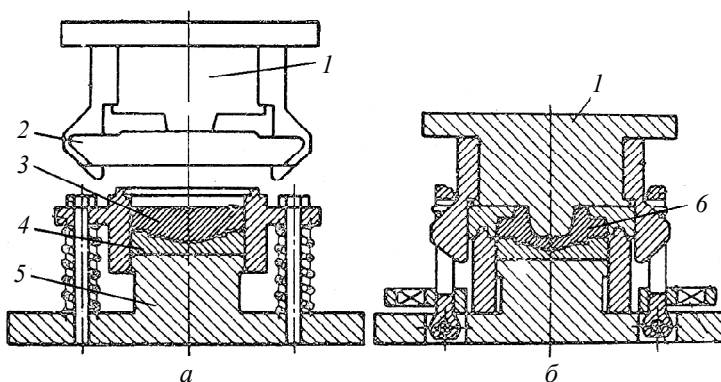


Рис. 8.1. Стадии штамповки жидкой стали:

*а* — начальная, *б* — конечная;

*1* — пуансон; *2* — съемник; *3* — жидкий металл; *4* — металлоприемник; *5* — корпус штампа; *6* — штамповка

лучшее качество металла (мелкозернистая структура, отсутствие пороков литого металла). Недостатки связаны с низкой стойкостью штампов, сложностью точной дозировки объема металла, снижением прочностных свойств изделий, так как они имеют мелкозернистую, а не волокнистую структуру.

## 8.2. Литье-прокатка

Одно из преимуществ непрерывной разливки стали — это возможность размещения в линии МНЛЗ прокатных станов с организацией литейно-прокатного комплекса. В этом случае производственный цикл становится максимально компактным, сокращаются энергозатраты на повторный нагрев заготовки (используется тепло литейного передела), уменьшаются потери металла в окалину, улучшается качество металла (рис. 8.2).

Литейно-прокатные комплексы широко используются в цветной металлургии для получения сортового и листового проката из алюминия, меди, цинка и других металлов. В черной металлургии

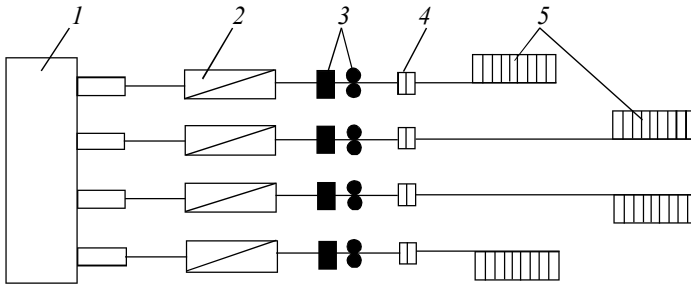


Рис. 8.2. Схема расположения оборудования заготовочного литейно-прокатного агрегата:

1 — четырехручьева МНЛЗ; 2 — подогревательные проходные печи; 3 — прокатные станы с горизонтальными и вертикальными валами; 4 — ножницы; 5 — холодильники

использование таких агрегатов затруднено тем, что скорость выхода полосы из МНЛЗ значительно ниже применяемых скоростей прокатки. Для обеспечения полной загрузки прокатных станов применяют подогревательные печи. Схема компоновки оборудования подобного агрегата приведена на рис. 8.2, где литьем формируется заготовка относительно крупных размеров порядка  $180 \times 180$  мм, а затем сразу же после завершения кристаллизации и небольшого подогрева обжимается в заготовку меньшего сечения (например,  $100 \times 100$  мм). Каждый ручей МНЛЗ имеет отдельную прокатную группу, состоящую из чередующихся клеток с горизонтальными и вертикальными валами.

Развивается использование литейно-прокатных агрегатов и для производства готового проката, где производительность прокатного стана еще больше отличается от производительности МНЛЗ. На рис. 8.3 приведена схема агрегата для выпуска стальной проволоки (катанки) диаметром 5—12 мм из НЛЗ сечением  $115 \times 87$  мм.

Для интенсивного двухстороннего обжатия заготовки применен универсальный планетарный стан с горизонтальными и вертикальными валами. За планетарным станом установлены две черновые и две непрерывные группы чистовых клеток.

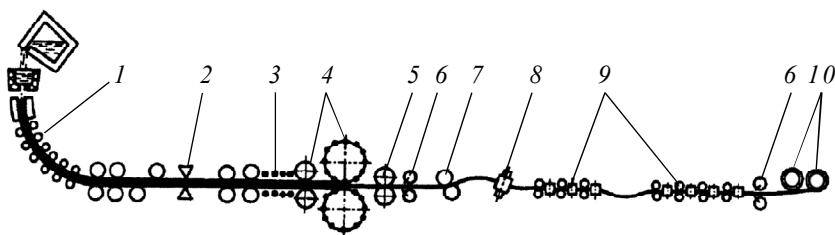


Рис. 8.3. Схема литейно-прокатного агрегата для производства стальной проволоки:

1 — МНЛЗ; 2 — летучие ножницы; 3 — индукционный нагреватель; 4 — планетарный стан; 5 — тянущие ролики; 6 — барабанные ножницы; 7 — черновая горизонтальная клеть; 8 — черновая вертикальная клеть; 9 — группы чистовых клетей; 10 — моталки

Другим примером может служить совмещенный агрегат для сортового проката, созданный в Японии (рис. 8.4)<sup>1</sup>. Здесь используется роторный кристаллизатор с колесом диаметром 2,4 м, в котором выполнен калибр для получения проката трапецеидального сечения, наружная поверхность которого ограничивается натянутой на роликах лентой. После кристаллизации заготовка при необходимости подогревается и поступает в прокатный стан с вертикальными и горизонтальными клетями, затем разрезается и подается для дальнейшей прокатки на сортовые станы.

Более широкое применение литейно-прокатные агрегаты нашли в цветной металлургии, например для производства алюминиевой полосы толщиной 10 мм и шириной 1 м в рулонах (рис. 8.5). Металл из миксера поступает в валковый кристаллизатор, затем при температуре 700 °С из распределительной коробки — в межвалковую щель и при дальнейшем движении вверх кристаллизуется в полосу, которую потом правят, режут и сматывают в рулоны.

<sup>1</sup> Ляшков В. Б., Шимов В. В., Харитонин С. В. Технологические схемы прокатного и трубного производства : учеб. пособие для вузов / Екатеринбург : Изд-во УГТУ—УПИ, 2006. С. 36.

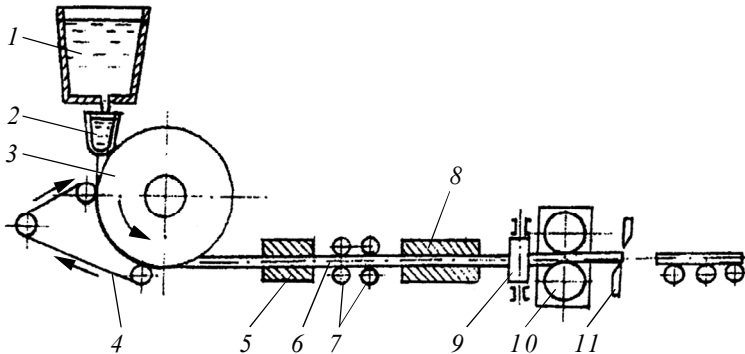


Рис. 8.4. Схема литейно-прокатного агрегата  
для получения сортового проката:

1, 2 — основной и вспомогательный сталеразливочные ковши; 3 — роторный кристаллизатор; 4 — прижимная лента; 5 — охладитель; 6 — заготовка; 7 — тянущие ролики; 8 — нагревательное устройство; 9, 10 — клетки с вертикальными и горизонтальными валами соответственно; 11 — ножницы

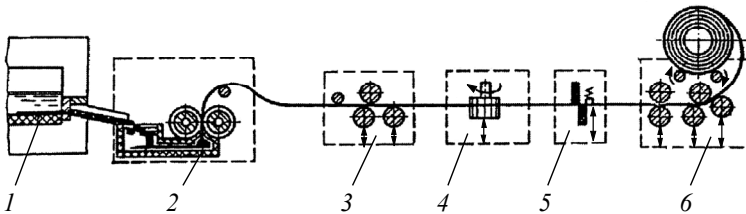


Рис. 8.5. Литейно-прокатный агрегат  
для производства алюминиевой полосы:

1 — миксер; 2 — валковый кристаллизатор; 3 — правильная машина; 4 — машина для фрезерования боковых кромок; 5 — ножницы; 6 — свертывающая машина

Известны также проекты вертикальных литейно-ковочно-прокатных агрегатов<sup>2</sup>. Один из основных элементов агрегата — вертикальный кристаллизатор, установленный на крышке герметич-

<sup>2</sup> Ресурсо- и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий металлургии при инновационном риске : учеб. для вузов : в 2 кн. Кн.1 / С. П. Буркин, Е. А. Коршунов, В. В. Шимов [и др.]. Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2010. 498 с.

ного промежуточного ковша (рис. 8.6)<sup>3</sup>. Вертикальная разливка производится за счет подачи в ковш газа под давлением, достаточного для подъема металла в кристаллизатор.

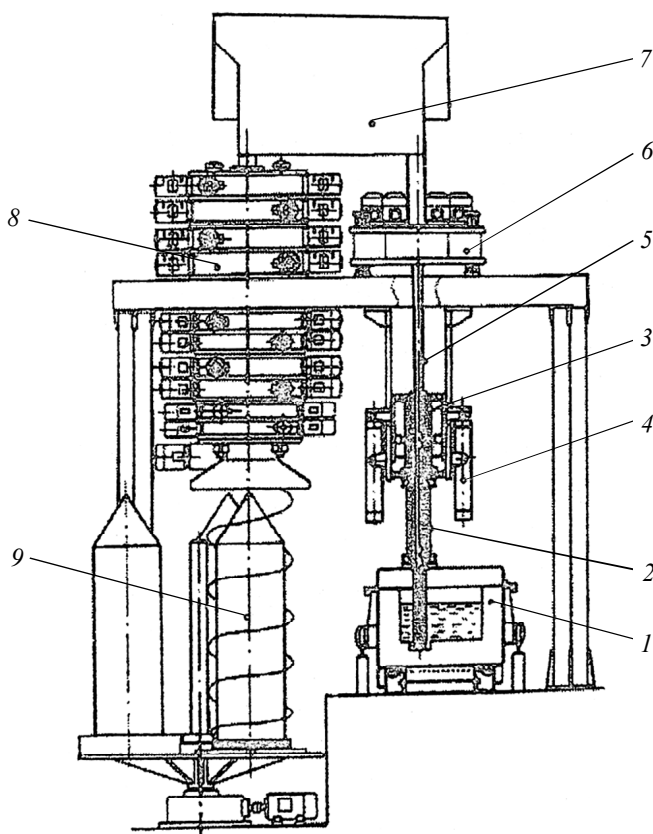


Рис. 8.6. Схема литейно-ковочно-прокатного модуля:

1 — промежуточный ковш; 2 — кристаллизатор; 3 — устройство зоны вторичного охлаждения; 4 — устройство подачи литой заготовки в ковочный блок; 5 — литая заготовка; 6 — ковочный блок; 7 — петлеобразователь; 8 — непрерывный прокатный блок; 9 — устройство приема катанки

<sup>3</sup> Ресурсо- и энергосбережение в металлургии... С. 137.

В данном агрегате разливается полая заготовка, из которой ковкой и прокаткой производят стальную проволоку диаметром 6,5 мм (см. рис. 8.6). При использовании полой заготовки обеспечивается мелкозернистость и однородность химического состава металла, который состоит только из поверхностных однородных слоев. Сформировавшаяся в кристаллизаторе полая заготовка подается в ковочный блок для заковки трубчатой заготовки в прутки. Заготовка предварительно подогревается в проходной муфельной печи сопротивления. Ковочный блок вертикального исполнения содержит 6 ползунов с бойками, приводимыми в движение эксцентриковыми механизмами от электродвигателей. Рабочие поверхности бойков образуют шестиугольный замкнутый контур. Далее через петлеобразователь, служащий для создания запаса металла и обеспечения синхронности работы агрегатов, заготовка поступает в 11-клетевой прокатный блок вертикального исполнения. Прокатный блок состоит из 10 обжимных четырехвалковых клеток и одной чистовой клетки. На заключительном этапе производится отделка и сворачивание проволоки в бунты.

### 8.3. Литье-прессование

Анализ возможных технических решений по совмещению горизонтальной непрерывной разливки и прессования<sup>4</sup> показал, что наиболее пригодным является полунепрерывное обратное прессование. Оно предполагает подачу в разъемный контейнер части длинномерной заготовки, ее радиальную деформацию при смыкании контейнера и обратное прессование (см. на рис. 6.7 схему обратного прессования прутка) путем движения контейнера навстречу пустотелому пресс-штемпелю с матрицей.

Структура подобного литейно-прессового агрегата приведена на рис. 8.7.

---

<sup>4</sup> Ресурсо- и энергосбережение в металлургии... С. 228.

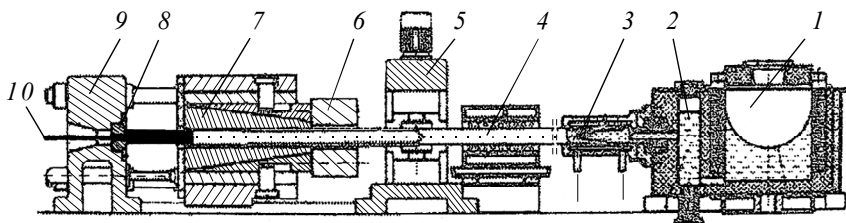


Рис. 8.7. Структура литейно-прессового агрегата:

1 — индукционная печь; 2 — промежуточный ковш; 3 — кристаллизатор; 4 — устройство вторичного охлаждения; 5 — прокатная клеть; 6 — подвижная поперечина пресса; 7 — контейнер; 8 — матрица; 9 — неподвижная поперечина пресса; 10 — прессуемый пруток

В качестве металлоприемника в агрегате используется индукционная печь, снабженная дополнительной емкостью, играющей роль промежуточного ковша МНЛЗ, к стенке которого крепится водоохлаждаемый кристаллизатор (см. рис. 8.7)<sup>5</sup>. За кристаллизатором установлено устройство вторичного охлаждения и прокатная клеть для придания заготовке плоско-овальной формы перед заданием в контейнер пресса. Прокатная клеть в начале периода разливки может выполнять также функцию вытяжного устройства. Затем заготовка вводится в составной контейнер пресса, раздавливается сегментами контейнера до круглого сечения и перемещается с контейнером на длину запроектированного шага вытягивания заготовки из кристаллизатора. Далее при рабочем ходе главных цилиндров пресса осуществляется прессование части заготовки. В данной конструкции проблема обратного перемещения литой заготовки для предотвращения поверхностных дефектов решена за счет осевого перемещения металла во время радиальной осадки в контейнере. Во время паузы в период кристаллизации очередной части слитка подвижная поперечина пресса смещает назад разомкнутый контейнер на величину хода прессования, и цикл обработки повторяется.

<sup>5</sup> Ресурсо- и энергосбережение в металлургии... С. 264.



## 8.4. Термомеханическая обработка

Термомеханическая обработка (ТМО) — это сочетание термической обработки и пластической деформации для повышения пластичности, прочности и вязкости металла<sup>6</sup>.

ТМО классифицируют по уровню температуры деформации металла  $T_{\text{деф}}$  (рис. 8.8) относительно температуры рекристаллизации металла  $T_p$ : на высокотемпературную ВТМО (если  $T_{\text{деф}} > T_p$ ) и низкотемпературную НТМО (если  $T_{\text{деф}} < T_p$ ).

При ВТМО сталей нагрев и деформацию производят выше точки  $A_{c3}$  (см. линию  $GS$  на рис. 2.11) в однофазной области аустенита, после чего проводят ускоренное охлаждение в воде или масле до температуры ниже мартенситного превращения  $T_m$ . Высокотемпературная деформация приводит к измельчению и большей однородности мартенсита. Для снятия закалочных напряжений далее проводят отпуск стали.

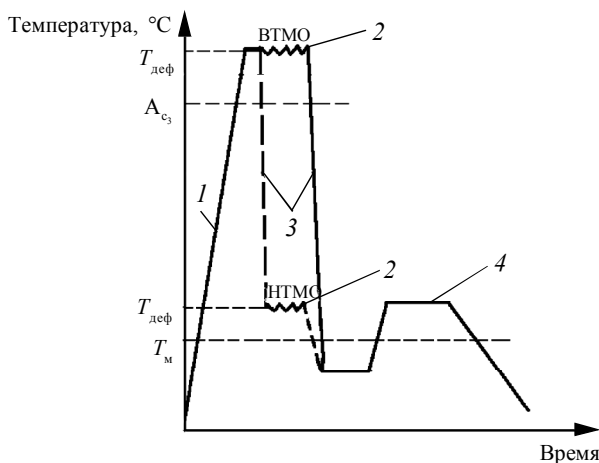


Рис. 8.8. Схемы термомеханической обработки стали:

1 — нагрев; 2 — пластическая деформация; 3 — ускоренное охлаждение; 4 — отпуск

<sup>6</sup> Физическое металловедение : учеб. для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов, В. П. Швейкин. Екатеринбург : Изд-во УГТУ—УПИ, 2001. 534 с.

При НТМО ускоренное охлаждение проводят перед пластической деформацией, чтобы не допустить развитие процессов рекристаллизации. При этом аустенит деформируется в условиях переохлаждения в состоянии метастабильного равновесия. Затем при дальнейшем охлаждении производится закалка на мартенсит для сохранения сформировавшейся в результате деформирования структуры металла. Заключительной операцией, как и при ВТМО, является отпуск металла.

Сравнение рассмотренных вариантов показывает, что ВТМО обеспечивает несколько меньшую прочность, но большую пластичность и ударную вязкость стали. НТМО требует больших энергетических затрат на проведение пластической деформации в охлажденном состоянии, что приводит к более интенсивному износу оборудования. Поэтому наибольшее промышленное использование получил способ ВТМО в линии многоклетевых прокатных станов, в том числе редуционно-калибровочных для прокатки труб, с охлаждением проката с помощью водных спрейеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены основы традиционных технологических процессов ОМД, которые широко используются на металлургических предприятиях. Каждый процесс имеет свои достоинства и недостатки, что ограничивает область его применения. Так, прокатка предназначена для получения длинномерных изделий одинакового поперечного сечения, а штамповка — для изготовления изделий малой длины достаточно сложной конфигурации. Поэтому одно из направлений совершенствования процессов ОМД — это применение совмещенных, синтезированных процессов, объединяющих достоинства известных способов и расширяющих область их использования. Например, известен способ ОМД, совмещающий прокатку и ковку (штамповку), — вальцовка, или прокатка в валках, имеющих периодический профиль наподобие штампа. Получающийся также периодический, профиль после разделения напоминает изделия после штамповки. Другими словами, совершенствование известных процессов связано с заполнением «технологических ниш» как по сортаменту получаемой продукции, так и по особенностям известных процессов, связанных с движением деформирующего инструмента, режимами нагрева и охлаждения, конструкциями применяемых машин для деформирования, принципами их функционирования.

Например, можно составить «матрицу взаимности» известных процессов (способов) ОМД и выявить «технологические ниши» на их пересечениях (см. табл.).

По приведенной таблице можно составить матрицу  $M$  нетрадиционных способов  $C$ :  $M = Cij$ . Очевидно, что  $C_{11} = C_{22} = C_{33} = C_{44} = C_{55} = 0$ , а способы с одинаковыми индексами идентичны:  $C_{12} = C_{21}$ ,  $C_{23} = C_{32}$  и т. д., т. е. матрица симметрична относительно своей диагонали и содержит  $2n$  нетрадиционных способов, составленных из  $n = 5$  традиционных.

Даже такой очевидно формальный подход позволяет выявить новые процессы: волочение-штамповка (4—3); прессоволочение

*Матрица взаимности известных процессов*

Традиционные процессы (способы) ОМД	(1) Прокатка	(2) Ковка	(3) Штамповка	(4) Волочение	(5) Прессование
(1) Прокатка	1—1	1—2	1—3	1—4	1—5
(2) Ковка	2—1	2—2	2—3	2—4	2—5
(3) Штамповка	3—1	3—2	3—3	3—4	3—5
(4) Волочение	4—1	4—2	4—3	4—4	4—5
(5) Прессование	5—1	5—2	5—3	5—4	5—5

(5—4), прессштамповка (5—3) и др. Процесс ковки-волочения (2—4) известен и упомянут выше как вальцовка. Возможно, некоторые из перечисленных процессов также уже известны, что может подтвердиться соответствующими патентными исследованиями.

Аналогичные матрицы можно составить по некоторым технологическим признакам, таким как движение инструмента (поступательное, вращательное, возвратно-поступательное, качательное, активное, пассивное и т. д.), движение клетки прокатного стана (неподвижная клеть, поступательное, вращательное, возвратно-поступательное движение и т. д.), сортамент получаемой продукции (например, в координатах длина – поперечный размер изделия). Может оказаться, что некоторые изделия нетипичных габаритов известными способами получить невозможно, а значит, следует изобретать новые.

Таким образом, некоторые простые системные подходы позволяют вскрыть определенные резервы совершенствования известных процессов, что является актуальной задачей для научных работников и молодых специалистов.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Баузер М.* Прессование : справ. руководство : пер. с нем. / М. Баузер, Г. Зауер, К. Зигерт. М. : АЛЮСИЛ МВиТ, 2009. 918 с.

*Грудев А. П.* Технология прокатного производства : учеб. для вузов / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. М. : Metallurgia, 1994. 653 с.

Ковка и штамповка : справочник : в 4 т. / ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.]. М. : Машиностроение, 1985—1987.

Краткий справочник металлиста / под ред. А. Н. Маслова. М. : Машиностроение, 1971. 767 с.

*Колмогоров В. Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение / В. Л. Колмогоров. М. : Metallurgia, 1970. 229 с.

*Ляшков В. Б.* Технологические схемы прокатного и трубного производства : учеб. пособие для вузов / В. Б. Ляшков, В. В. Шимов, С. В. Харитонин. Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 129 с.

*Марголит Р. Б.* Надежность технологических процессов : обзор / Р. Б. Марголит. М. : НИИмаш, 1984. 56 с.

*Мастеров В. А.* Теория пластической деформации и обработка металлов давлением : учеб. для техникумов / В. А. Мастеров, В. С. Берковский. М. : Metallurgia, 1989. 400 с.

Обработка металлов давлением / Ю. Ф. Шевакин, В. Н. Чернышев, Р. Л. Шаталов, Н. А. Мочалов. М. : Интермет Инжиниринг, 2005. 496 с.

*Охрименко Я. М.* Технология кузнечно-штамповочного производства : учеб. для вузов / Я. М. Охрименко. М. : Машиностроение, 1976. 560 с.

Политехнический словарь. 2-е изд. / гл. ред. акад. А. Ю. Ишлинский. М. : Сов. энцикл., 1980. 656 с.

Ресурсо- и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий металлургии при инновационном риске : учеб. для вузов : в 2 кн. Кн. 1 / С. П. Буркин, Е. А. Коршунов, В. В. Шимов и др. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2010. 498 с.

*Смирнов В. К.* Калибровка прокатных валков : учеб. пособие для вузов / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Теплотехника, 2010. 490 с.

Технология трубного производства : учеб. для вузов / В. Н. Данченко, А. П. Коликов, Б. А. Романцев, С. В. Самусев. М. : Интермет Инжиниринг, 2002. 640 с.

Физическое металловедение : учеб. для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов, В. П. Швейкин. Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. 534 с.

*Шилов В. А.* Технология прокатного производства : учеб. пособие для вузов / В. А. Шилов, Д. Л. Шварц. Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 125 с.

*Щерба В. Н.* Технология прессования металлов : учеб. для вузов / В. Н. Щерба, Л. Х. Райтбарг. М. : Металлургия, 1995. 336 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Общие сведения о технологических процессах .....</b>	<b>4</b>
1.1. Основные термины и определения .....	4
1.2. Надежность технологических процессов .....	17
<b>2. Особенности и виды технологических процессов ОМД .....</b>	<b>26</b>
2.1. Основные понятия теории ОМД .....	26
2.1.1. Напряженное состояние .....	26
2.1.2. Деформированное состояние .....	31
2.1.3. Сопротивление деформации .....	43
2.1.4. Система дифференциальных уравнений теории пластичности .....	43
2.1.5. Пластичность и разрушение .....	46
2.1.6. Работа и мощность пластической деформации .....	49
2.2. Обрабатываемость давлением металлов и сплавов .....	51
2.3. Качество продукции ОМД .....	60
2.4. Виды ОМД. Этапы технологических процессов .....	67
2.5. Исходная заготовка для ОМД .....	71
2.6. Нагрев металла и температурный интервал ОМД .....	74
<b>3. Основы технологии прокатки .....</b>	<b>78</b>
3.1. Классификация и виды продукции .....	78
3.2. Калибровка валков .....	81
3.3. Производство блюмов и слябов .....	84
3.4. Горячекатаный лист .....	87
3.5. Заготовка .....	89
3.6. Сортовой прокат .....	90
3.7. Катанка .....	92
3.8. Холоднокатаный лист .....	93
<b>4. Основы технологии волочения .....</b>	<b>95</b>
4.1. Преимущества и недостатки процесса волочения .....	95
4.2. Классификация процессов волочения .....	96

---

<b>5. Основы технологииковки и штамповки .....</b>	<b>100</b>
5.1. Технологияковки .....	100
5.1.1. Классификацияпоковок .....	102
5.1.2. Операцииковки .....	103
5.1.3. Этапыразработки технологии .....	110
5.2. Технологияштамповки .....	115
5.2.1. Горячаяобъемная штамповка .....	117
5.2.2. Холоднаяобъемная штамповка .....	125
5.2.3. Листовая штамповка .....	129
<b>6. Основы технологиипрессования .....</b>	<b>135</b>
6.1. Общие понятия .....	135
6.2. Разновидности прессования .....	139
6.3. Технологические схемы производства .....	151
<b>7. Технология производства труб .....</b>	<b>154</b>
7.1. Стадии производства .....	154
7.2. Производство на трубопрокатных агрегатах .....	167
7.3. Производство на трубопрессовых агрегатах .....	173
7.4. Производство на трубосварочных агрегатах .....	174
7.5. Производство холоднодеформированных труб .....	176
<b>8. Совмещенные процессы .....</b>	<b>181</b>
8.1. Литье-штамповка .....	181
8.2. Литье-прокатка .....	182
8.3. Литье-прессование .....	187
8.4. Термомеханическая обработка .....	189
<b>Заключение .....</b>	<b>191</b>
<b>Список рекомендуемой литературы .....</b>	<b>193</b>



Учебное издание

**Орлов** Григорий Александрович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ  
ДАВЛЕНИЕМ

Учебное пособие

Заведующий редакцией *М. А. Овечкина*

Редактор *Р. Н. Кислых*

Корректор *Р. Н. Кислых*

Компьютерная верстка *Г. Б. Головиной*

План изданий 2013 г. Подписано в печать 20.05.13  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times  
Уч.-изд. л. 10,92. Усл. печ. л. 11,63. Тираж 100 экз. Заказ 1107

Издательство Уральского университета  
620000, Екатеринбург, пр. Ленина, 51

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: + (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс +7 (343) 358-93-06  
E-mail: [press.urfu@mail.ru](mailto:press.urfu@mail.ru)

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК